Climatologie du monde souterrain

TOME 1

Vents des ténèbres

Édition du Comité Départemental de Spéléologie de Isère

Adresse de l'éditeur : 6 boulevard Foch, 38000 Grenoble. On peut adresser les commandes à cette adresse.
Avec une aide de la région spéléo Rhône-Alpes C, et de la Fédération Française de Spéléo.

CLIMATOLOGIE DU MONDE SOUTERRAIN
tome 1- Vent des Ténèbres, (ce volume)
tome 2- Aérologie des Systèmes Karstiques

L'auteur : Baudouin LISMONDE
Club des «Spéléos Grenoblois du Club Alpin Français»

dessins humoristiques de Régine LANDRY

Des observations ou des remarques sont bienvenues. On peut les envoyer à l'adresse de l'éditeur.

Photos de couverture
1ère page en bas à gauche : traces dues à l'impact des gouttes dans un courant d'air à la Cañuela (avec F. Landry, photo B.L.).
1ère page en bas à droite : anémolithe, grotte de Malaval (Lozère, France), photographie Philippe Guillemin, Association Malaval.
1ère page en haut à gauche : prospection hivernale au Parmelan (avec Guy Masson, photo B.L.).
1ère page en haut à droite : concrétions profilées par le courant d'air à la Dent de Crolles (photo B.L.).
4e page : au bas du deuxième puits du Grand Massacre (Parmelan) (avec Agnès Daburon, photo B.L).

ISBN 2-902670-48-6

Climatologie du monde souterrain

TOME 1

Vents des ténèbres

Baudouin LISMONDE

Remerciements

Cet ouvrage n'aurait pu paraître sans l'aide d'un grand nombre de personnes que je vais essayer de citer ici. On en trouvera d'autres au début du tome 2.

Les dessins humoristiques sont de Régine Landry. On les trouvera pages 17, 22, 26, 61, 62, 69, 70, 71, 74, 76, 82, 93, 103, 131. J'ai utilisé une photo de Remy Wenger et une autre de Philippe Guillemin. Merci à eux et à Daniel Chailloux pour son aide.

En premier lieu, ma reconnaissance va à Jacques Choppy dont l'activité en faveur de la spéléologie scientifique est inlassable. Son intérêt pour les climats souterrains, sa connaissance encyclopédique du sujet, ses nombreuses publications, sa disponibilité sont irremplaçables et ont été pour moi un profond stimulant.

Remerciements pour Donald Accorsi qui m'a communiqué ses intéressantes analyses chimiques, Philippe Haüselman pour des observations dans les Siebenhengste, Pierre Mouriaux qui m'a fait part de ses trouvailles bibliographiques sur les mines anciennes, Jean-Louis Rocourt qui m'a signalé un phénomène curieux, Éric Sanson toujours à l'affût des nouveautés, Robert Thérond fourmillant d'idées. J'ai beaucoup discuté de ces questions avec les spéléos au cours de sorties spéléos ou de rencontres, et ces discussions m'ont beaucoup apporté. Je ne peux citer tous les noms ici, et je craindrais du reste d'en oublier.

Sur le terrain, j'ai toujours trouvé des spéléos pour m'accompagner dans les sorties dites scientifiques, quelquefois passionnantes, quelquefois rebutantes (Frédéric Aitken, Agnès Daburon, Émmanuel et Chantal Fouard, François Landry, Éric Laroche-Joubert, Yann Cairo, Delphine Fabbri, Julien Caullireau …).

Merci à Chantal Fouard qui a passé de longues heures à vérifier la correction de l'écriture, et à Paul Rice qui a vérifié et corrigé l'anglais des légendes des figures.

Les spéléos grenoblois du CAF ont développé une commission scientifique et débloqué des crédits pour l'acquisition de thermomètres *ibuttons* de Dallas.

Le CDS Isère m'a toujours accordé son soutien pour éditer mes ouvrages. Celui-ci est risqué en terme d'édition. Qu'il en soit remercié ici, plus particulièrement Marie Hernequet et Bernard Cruat, les deux présidents successifs.

La région spéléo Rhône Alpes a attribué une subvention de 762 € pour l'aide à la publication. De même la Fédération Française de Spéléo a donné 225 €. La commission scientifique de la Fédération Française de Spéléologie (Pierre Mouriaux, Christophe Gauchon, Fabien Hobléa et Stéphane Jaillet) m'a apporté son aide pour l'acquisition de matériel de mesure de résistance aéraulique.

Bien entendu, j'ai une dette envers ma famille, puisque le temps consacré à cet ouvrage leur a été volé en partie.

Introduction

Contenu général de l’ouvrage : Climatologie du monde souterrain

L’ouvrage est divisé en deux tomes. Le premier tome (celui-ci) est intitulé *Vents des Ténèbres* . Il est plus particulièrement destiné aux spéléologues soucieux de comprendre ce qu’ils observent. Le deuxième tome intitulé *Aérologie des systèmes karstiques* est plus théorique et s’adresse plutôt aux scientifiques qui ne sont pas trop rebutés par la modélisation physique et mathématique. Beaucoup d’idées seront vues d’une manière succincte dans le tome 1 et plus ou moins approfondies dans le tome 2.

Tome 1 : Vents des ténèbres

Les courants d’air souterrains sont d’abord du domaine de l’observation. Le spéléo regarde, fait des remarques, établit des corrélations entre divers phénomènes. Le premier chapitre se présente sous une forme anecdotique, et fait un petit tour parmi les phénomènes que l’on peut observer en relation avec les courants d’air souterrains et la climatologie souterraine. Certains sont archi-connus et observables tous les jours, d’autres sont rares ou même uniques. Cette palette d’observations servira de base, et constituera comme une sorte de fond culturel pour aborder les chapitres suivants. Elle sera la matière sur laquelle viendront s’appliquer les raisonnements des autres parties. Nous avons fait beaucoup appel à des observations personnelles, mais on trouverait dans les ouvrages ou articles cités en bibliographie des observations similaires. Ces petits récits permettent de présenter en situation quelques notions importantes et quelques interprétations.

La deuxième partie, le kaléïdoscope des 317 questions, est un large éventail d’interrogations attachées aux courants d’air. Leur nombre témoigne de la variété des sujets traités qui dépassent largement les seuls courants d’air et abordent les questions de climatologie et de formation du karst. Nous avons passé en revue la toxicité des gaz à l'occasion, par exemple, de dynamitages, et avons développé quelques idées sur la ventilation des galeries en cas de secours.

La troisième partie présente quelques exemples d’études expérimentales possibles sur les courants d’air et les climats souterrains. Quelques sujets d'études sont donnés et détaillés. L’instrumentation en est volontairement peu élaborée, voire inexistante, et d’un niveau à peu près accessible à des amateurs. Un index alphabétique assez fourni permet de retrouver facilement les notions principales.

Tome 2 : Aérologie des systèmes karstiques

Le deuxième tome présente une sorte de théorie partielle de l’air et du climat souterrain avec des développements mathématiques ou numériques. Le mot aérologie est ici pris comme pendant au mot hydrologie. Il veut englober l’air dans ses relations avec le karst. Ce deuxième tome est la suite logique du premier car il n’y a pas d’observation profitable sans un modèle théorique sous-jacent. C’est à partir de là que l’on franchit le stade de l’observation ordinaire et que l’on fait de la science. Mais la science n’est pas innée. Elle demande un effort de conceptualisation.

L’objet de la première partie est de présenter les notions qui sont utiles à la compréhension et à l’étude des courants d’air souterrains et des transferts associés. Ce sont les «outils scientifiques». Pour ceux qui sont familiers de ces questions, ce chapitre ne constituera qu’une sorte de pense-bête. Mais certaines notions sont difficiles. Ne considère-t-on pas trop souvent le théorème de Bernoulli comme s’il traduisait la conservation de l’énergie ? Le concept de pression est subtil et exige une réflexion soutenue.

Dans la deuxième partie, nous présentons les caractères thermiques de l’atmosphère qui sont à l’origine du vent souterrain et nous essayons de ramener la complexité géométrique des cavités naturelles à quelques types très simplifiés et schématiques qui contiennent néanmoins les ingrédients capables d’expliquer la plupart des phénomènes observés dans les réseaux réels. Nous nous limitons dans cette partie à une étude à un instant donné.

Puis, dans la troisième partie, nous développons les concepts de mémoire thermique et présentons quelques modèles théoriques qui permettent de comprendre les notions d’inertie thermique, d’hystérésis, de longueurs influencées d’un système souterrain, de temps de relaxation climatique d’une caverne, et les diffusions pour les grandeurs chimiquement importantes.

La quatrième partie, enfin, est consacrée à une mise en perspective des courants d'air dans le système karstique. Le karst est décomposé pour la facilité de son étude en quatre parties : l'air, l'eau, la roche et la matière vivante. La part de l'air est examinée dans son rôle sur la structuration d'un karst. Sous cet angle de vue, cet ouvrage tout entier constituerait la première des quatre parties d'un ambitieux traité de karstologie ! La part de l'air est examinée dans son rôle sur la structuration du karst. En particulier, l'accent est mis sur les phénomènes de transports, renouvellement de l'air, advection du dioxyde de carbone qui sont à la base de la spéléogenèse.

En annexe, est approfondie la notion de diffusion et de turbulence, et une petite étude est proposée sur l'entraînement de l'air par les cascades. Puis viennent une bibliographie générale pour les deux tomes ainsi qu'un index alphabétique pour le tome 2.

Dans quel esprit a été écrit ce livre ?

Le premier tome a été écrit pour les spéléos explorateurs qui côtoient à longueur d'expéditions ces fameux courants d'air. Il est destiné aussi à des amateurs des sciences de la nature, des naturalistes, qui trouveront là de jolis phénomènes naturels, quelquefois assez complexes. Je n'ai pas essayé de faire une synthèse du sujet. On se tournera plutôt pour cela vers les ouvrages de Jacques Choppy. Je n'ai pas cherché non plus à citer toutes les sources. Ce tome 1 est donc assez loin des critères universitaires.

Le deuxième tome entre dans le vif du sujet et aborde en détail certains problèmes scientifiques. Il s'adresse plutôt à des chercheurs géographes, géologues ou géophysiciens ou à des spéléos ayant fait des études universitaires de premier cycle. Mon ambition est de proposer des outils un peu élaborés qui puissent servir à d'autres études. Mais même dans ce deuxième tome, les résultats seront mis, autant que possible, sous une forme exploitable par tous les spéléos. Et du reste, un système de renvois et l'index alphabétique devraient permettre de relier aspects spéléologiques, aspects physiques et aspects mathématiques. Les sources sont citées un peu plus systématiquement, mais de nombreux travaux n'ont même pas été évoqués, car ils ne cadraient pas avec mon objectif de présenter les outils d'une modélisation physique du karst.

Nous n'avons pas cherché à trouver l'origine de toutes les idées sur le sujet. En revanche, nous avons voulu fournir la présentation la plus cohérente possible sur un sujet à cheval sur plusieurs disciplines. Pour chacun des concepts, nous avons essayé de prendre le point de vue de la discipline la plus proche, et celui qui procure la vue la plus synthétique.

Cet ouvrage est un ouvrage de vulgarisation dans le sens où il ne suppose pas du lecteur une connaissance approfondie du sujet, mais c'est aussi un ouvrage de recherche en ce sens qu'il essaye d'aller le plus loin possible. Il ne fait aucun doute qu'il n'est pas facile à lire ...

Qu'on me pardonne de faire maintenant un plaidoyer pour les études un peu mathématiques. Quand on compare le niveau des recherches dans deux disciplines similaires quant à leur objet, la glaciologie et la spéléologie physique, on est frappé de voir le faible niveau d'élaboration de notre discipline favorite. La différence ne peut pas s'expliquer uniquement par la différence des enjeux économiques de l'une et l'autre de ces disciplines. Car la karstologie est autrement plus importante pour les sociétés humaines que la glaciologie. Il y a dans l'histoire de la glaciologie un virage vers la modélisation mathématique des phénomènes qui a été pris dans les années 60-70 (cf. Lliboutry) et qui n'a pas été pris en spéléologie physique. Il faut développer en France une collaboration entre plusieurs disciplines pour aborder dans toutes ses facettes cet objet passionnant qu'est le karst.

Attention ! La modélisation mathématique des sciences de la Nature ne peut pas se concevoir sans une forte partie observationnelle. Mais l'observation privée de conceptualisation, les faits expérimentaux accumulés au hasard sans des idées unificatrices fortes, ne constitueront qu'un fatras de données rarement exploitables par la suite. C'est le va-et-vient entre l'idée théorique et l'observation qui peut le mieux enrichir la spéléologie physique. Je n'attaque pas du tout ici les géographes, je regrette simplement qu'ils ne soient pas épaulés dans leur recherche par des géophysiciens aussi passionnés qu'eux par le sujet.

Les sources et les travaux antérieurs

En premier lieu, citons la collection de Jacques Choppy sur la climatologie souterraine. Cet ensemble de fascicules fait la synthèse des travaux dispersés dans le monde entier. C'est une oeuvre irremplaçable qui apporte aux personnes intéressées un gain de temps et une économie considérable d'efforts, en leur évitant de chercher les articles dans une foule de publications erratiques et difficilement accessibles. Dans le cours de l'ouvrage, je renverrai constamment le lecteur à cette référence. Je peux dire combien la lecture de ses livres m'a stimulé pour la réalisation de celui-ci, et je reconnais volontiers la dette que j'ai contractée envers Jacques Choppy.

En deuxième lieu arrive le livre de Félix Trombe : *Traité de spéléologie*, dont la partie sur la climatologie, bien qu'assez courte, est excellente. Dans cet ouvrage, Trombe me fascine depuis trente ans par la profondeur de ses vues. Sorti en 1952, le livre s'est très mal vendu et on pouvait encore le trouver dans les années 70 au prix dérisoire de 12,00 F. Puis, il s'est enfin épuisé, et aussitôt son prix s'est envolé, juste retour des choses pour un ouvrage si remarquable.

En France, la recherche a été faite principalement par Claude Andrieux du Laboratoire Souterrain de Moulis qui a consacré sa thèse à l'étude des courants d'air et des mesures en climatologie souterraine. Il sera cité abondamment aussi. Philippe Renault a été l'initiateur, malheureusement peu suivi, d'une étude systématique des transferts de dioxyde de carbone, dans la lignée du chimiste Roques. Cette voie de l'étude des transferts reste presque entièrement à défricher et elle constitue un enjeu passionnant pour le karstologue.

Plus récemment, les articles ou ouvrages anglo-saxons ou italiens témoignent de l'intérêt des karstologues de ces pays pour la climatologie. J'ai largement utilisé leurs travaux dont quelques uns rejoignent directement mes préoccupations (Wigley & Brown, Conn, Badino...). En Italie, Giovanni Badino a écrit en 1995 un remarquable ouvrage sur le climat souterrain : *Fisica del clima sotterraneo*. Sa lecture en est très recommandable. Nos visions du karst sont très voisines, mais sa volonté de ne jamais déboucher sur des calculs à traiter sur ordinateur, l'a écarté d'une analyse détaillée des problèmes thermiques. C'est pour cette raison de complémentarité par rapport à lui que je les ai ici bien décortiqués. Les problèmes sont les mêmes, nos approches sont différentes et complémentaires. L'analyse qu'il a faite des effets résistifs, capacitifs et inductifs qui interviennent en climatologie souterraine est très profonde, et je n'ai pas cherché à aller aussi loin que lui dans cette direction.

En Suisse, l'institut dirigé par Pierre-Yves Jeannin, l'ISSKA, a mis dans ses programmes de recherche, la climatologie souterraine. En France enfin, la climatologie fait partie des centres d'intérêt de l'équipe de géographes de l'université de Savoie. Le cloisonnement cher aux français empêche malheureusement le développement de recherches vraiment pluridisciplinaires, par exemple entre géophysiciens, géologues et géographes. En Amérique du Nord, une tradition plus ancienne a produit d'excellents résultats (étude sur des cavités comme Wind cave, thèses universitaires…). Dans les pays de l'Europe de l'est et la Russie, les chercheurs se sont orientés assez tôt vers l'étude des transferts dans le karst et le rôle des cycles d'évaporation-condensation.

La climatologie souterraine bénéficie actuellement d'un regain d'intérêt lié aux préoccupations environnementales associées aux fluctuations climatiques de la terre et du rôle éventuel de l'homme. Je serais très satisfait si cet ouvrage pouvait acompagner ce regain, voire susciter des vocations.

Table des matières du tome 1

Notations et symboles pour le tome 1

Dans le tome 2, on trouvera un index beaucoup plus complet des notations, valable pour les deux tomes. Ici, nous nous contenterons de donner les notations pour le seul premier tome.

A	amplitude relative
a	diffusivité thermique ($m^2.s^{-1}$)
a	vitesse du son ($m.s^{-1}$)
C_x	coefficient de trainée
c	célérité d'une onde ($m.s^{-1}$)
c_p, c_v	capacité thermique massique ($J.kg^{-1}.K^{-1}$)
D	diamètre (m)
d	longueur (m)
E	énergie (J = joule))
e	distance (m)
f	fréquence (s^{-1})
g	accélération de la pesanteur ($m.s^{-2}$)
H, h	hauteur (m)
J	symbole du Joule, unité d'énergie
kg	symbole du kilogramme, unité de masse
L	longueur (m)
m	masse (kg)
m	symbole du mètre, unité de longueur
P	périmètre (m)
P	puissance (W = watt)
Pa	symbole du Pascal, unité de pression
p	pression (Pa)
ppm	partie par millions
q	débit volumique ($m^3.s^{-1}$)
q_m	débit massique ($kg.s^{-1}$)
R	résistance aéraulique ($kg^{-1}.m^{-1}$)
R	rayon (m)
r	constante des gaz parfait pour l'air (287 $J.kg^{-1}.K^{-1}$)
S	surface, section (m^2)
s	symbole de la seconde, unité de temps
T	durée (s)
T	température (K = Kelvin)
t	temps (s)
U, u	vitesse ($m.s^{-1}$)
V	volume (m^3)
W	symbole du watt, unité de puissance
x, y	amplitudes relatives
z	altitude (m)
α	*(alpha)* fraction volumique
Γ	*(Gamma)* densité d'aire interfaciale (m^{-1})
γ	*(gamma)* constante des gaz = 1,405 pour l'air
Δ	*(Delta)* variation d'une grandeur
η	*(êta)* rendement
σ	*(sigma)* tension superficielle de l'eau ($N.m^{-1}$)
θ	*(thêta)* température (°C = degré Celsius)
Λ	*(Lambda)* coefficient de perte de charge linéïque
ρ	*(rhô)* masse volumique ($kg.m^{-3}$)
μ	*(mu)* viscosité dynamique (Pa.s)
ν	*(nu)* viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$)
Φ	*(Phi)* flux lumineux (W)
φ	*(phi)* densité de puissance ($W.m^{-2}$)

Mythologie souterraine moderne

Le Vent et l'Eau : ces deux voyageurs des cavernes

Commençons cet ouvrage qui se veut rationnel, par un léger détour parmi l'irrationnel. Les philosophes disent : les fondements des sciences, leur justification, sortent de leur domaine. La physique est fondée sur une métaphysique. Nous ancrerons la nôtre sur une mythologie.

Cet ouvrage a pour objet partiel de décrire les courants d'air qui sillonnent les cavités naturelles. Le spéléologue les connaît bien. Les ruisseaux enchantent le regard et l'oreille de l'explorateur, mais les courants d'air souterrains, tissant leurs fils invisibles, le guident dans sa recherche des arcanes de la caverne. Ce sont eux qui témoignent des relations lointaines que le réseau a nouées avec les différents flancs de la montagne. C'est encore ce vent qui trahit la respiration des immenses vides souterrains. Ce courant d'air, ce vent de la terre, est l'ami de l'explorateur. Nulle crainte n'est attachée à sa pensée. Il est un élément intellectuel. Mais quelle importance, il a ! Les trois quarts du monde souterrain seraient restés inconnus s'il n'avait montré la voie. Et plus les techniques spéléos progressent, et plus grandit l'importance du courant d'air.

À l'opposé, l'eau est l'élément passionnel, objet du désir du spéléo. C'est elle qui justifie la quête incessante de l'explorateur, son opiniâtreté à revenir fouiller, gratter, désobstruer... La rivière souterraine, c'est une maîtresse mythique et convoitée du voyageur des ténèbres. Et comme dans toute quête amoureuse, l'homme a tendance à surévaluer l'objet de ses pensées. N'en vient-il pas à habiller un simple ruisselet du nom prestigieux de «rivière» ? Cette mise sur un piédestal est nécessaire pour justifier ses immenses efforts.

Mais il y a un revers à cette passion. L'eau est un élément cruel. Le bruit cristallin et gracieux peut devenir grondement et mugissement. Les cascades élégantes peuvent se transformer en cataractes furieuses. La grotte débonnaire peut devenir effroi et chaos. L'eau a une face blanche et une face noire, et celui qui fréquente le monde souterrain, un jour ou un autre, se sentira comme Sémélé qui voulut regarder Zeus dans toute sa majesté, et en fut foudroyée. L'eau comme la Grande Déesse des sociétés néolithiques, inspire la passion et la peur (Walter, 1977).

L'air au contraire est un élément transparent. Il n'a pas deux faces, mais une seule. Il est comme la figure du Grand Dieu. Il est un maître indifférent et quelquefois glacé mais non pas dangereux. Il n'est pas un aboutissement, ni l'objet des désirs. Il oblige l'explorateur à la discipline de l'observation. Il est une clé, la meilleure pour la découverte. Le spéléologue apprend à l'apprécier, voire à l'aimer, jamais de passion, mais sans ambivalence. Comme Charon, il est le guide qui vous fait franchir l'obstacle. Il est le fil d'Ariane qui révèle l'énigme du Labyrinthe.

Le vent possède tout de même un charme qui lui est propre. Le spéléologue qui furète dans tous les coins d'une salle à la recherche d'une «suite» problématique, renaît quand il voit une modeste fissure aspirer goulûment le léger brouillard de son souffle. Il tient la «suite» ! Ou bien, quand il chemine tranquillement dans une galerie et qu'il est caressé par un souffle froid, voilà promesse de première ! Le non spéléologue qui observerait avec quel soin maniaque le spéléo est à l'affût de ce vent, et du chemin qu'il prend, serait bien surpris. Ces hommes des ténèbres sont-ils tous des malades ? Sans doute non, ce sont seulement des explorateurs passionnés qui se sont alliés au meilleur guide sous la terre et en suivent scrupuleusement les conseils. Le vent n'est que le guide, la passion reste l'eau …



Fig. 1.0- Dessin de Crisse tiré de la bande dessinée l'Épée de Cristal
montrant le climat et le courant d'air des grottes
dans l'imaginaire du 20e siècle

Première partie

Observations

Les courants d'air et les phénomènes climatiques que nous voulons décrire présentent des aspects très variés. Il est nécessaire de posséder dans sa mémoire un éventail de situations où l'on voit le courant d'air en action.

Le spéléo actif possède cet éventail car il a fréquenté assidûment les cavités. Certains d'entre eux n'ont peut-être pas fait attention à ces phénomènes et ces quelques observations viendront leur rappeler qu'ils les connaissent.

Mais il est certainement quelques lecteurs qui ne sont pas spéléos mais simplement curieux de la nature, plus intellectuels que sportifs. C'est particulièrement pour eux que nous avons rédigé cette partie très descriptive, anecdotique et un peu interprétative, quand l'interprétation ne demande pas de développements physiques ou mathématiques.

Nous avons rangé les observations par catégories afin de mettre un certain ordre dans un ensemble qui reste, malgré tout, assez disparate.

1.1. Courants d'air, naissance et disparition

1.1.1. Naissance d'un courant d'air. La deuxième entrée du Mort Ru (grotte des Masques)

La grotte du Mort Ru est située en Chartreuse et les Spéléos Grenoblois du CAF y ont fait, à la suite des Savoyards, de nombreuses escalades. Un réseau remontant, le réseau Oublié, nous a permis d'atteindre la cote + 300 environ. Nous ne devions pas être loin de la surface et nous fîmes un repérage magnétique pour situer précisément les galeries terminales par rapport à la surface (à l'aide de l'appareil Molefone). Après quelques tâtonnements, un certain endroit du trou, la salle des Masques, se révéla très près de la surface, à peu près à 5 m d'une petite grotte colmatée au pied d'une barre de falaise. Nous décidâmes d'ouvrir le passage en novembre 1989.

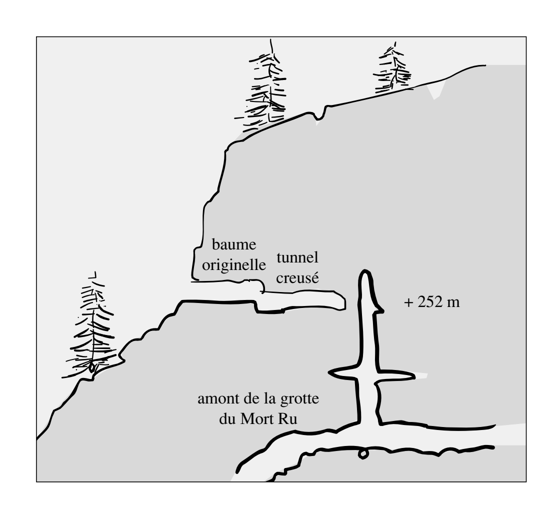


Fig. 1-1- Naissance d'un courant d'air à l'ouverture de la grotte des Masques (Chartreuse)

Birth of an air stream by opening-up of Maskes cave

Le travail de désobstruction fut plus difficile que prévu car au lieu d'un simple colmatage au fond de la grotte, c'est à la roche en place que nous nous heurtâmes. Nous avions passé plusieurs journées de travail à ouvrir un tunnel à coups d'explosifs. La lassitude commençait à se répandre dans nos rangs. Certes, le dernier tir avait produit un beau nuage bleuté sortant du porche que nous avions admiré de loin. Mais un doute s'insinuait sur la qualité du repérage. L'absence de ventilation et la toxicité des gaz nous obligèrent à remettre au lendemain l'examen du résultat. Au petit matin du lendemain, un simple coup d'œil nous révéla que le petit tunnel restait désespérément borgne, et le sort sembla ensuite se liguer contre nous. La perceuse rendit l'âme. Plus moyen de creuser ! En désespoir de cause, je bourrai une dernière charge dans un trou fait la veille et je fis partir la mine. Comme à l'habitude, nous regardions vers l'entrée mais il n'y eut pas de nuage. Je me précipitai dans la baume. L'air en était parfaitement transparent, et au fond du boyau, un splendide trou noir aspirait goulûment l'air du porche. Nous avions assisté à la naissance tonitruante d'un courant d'air !

La deuxième entrée était ouverte, le nouveau courant d'air s'engouffrait dans le Mort Ru. Je l'ai mesuré plus tard, un jour de canicule. Il faisait 500 l/s, ce qui est important, Mais en bas, au porche du Mort Ru, c'est 12 m^3/s qui sortaient, c'est à dire 20 fois plus. Cette nouvelle entrée n'a guère perturbé le régime climatique de la cavité.

1.1.2. Courant d'air au moment du désamorçage d'un siphon

Henry Salvayre, grand spécialiste du désamorçage de siphons par pompage, rapporte qu'à certaines ouvertures, un courant d'air violent peut apparaître brutalement au moment du désamorçage. En général, il dure un certain temps puis s'arrête (Salvayre, 1995, p 127-129). Rapportons la description qu'il fait du courant d'air accompagnant le désamorçage d'un siphon situé à 750 m de l'entrée à la grotte des Sourguettes (Aveyron).

«Dans la grotte des Sourguettes, l'ouverture du siphon était toujours accompagnée par un violent courant d'air qui se propageait jusqu'à l'entrée de la grotte où se produisait alors une inversion du mouvement de l'air suivant trois phases distinctes :

- entrée de l'air dans la grotte à la vitesse d'un mètre par seconde,
- arrêt du courant d'air,
- expulsion de l'air de la grotte à la vitesse de dix mètres à la seconde.»

Ce phénomène, pas facile à expliquer, montre bien que la pression de l'air est facilement influencée par les siphons et les fluctuations du niveau des surfaces libres.

1.1.3. Des bouchons très efficaces pour les courants d'air : les siphons temporaires

Quand on connaît bien une cavité et qu'on la parcourt souvent, on perçoit la complexité de la circulation des courants d'air au rôle que peut jouer l'eau. Ainsi, au Trou qui Souffle de Méaudre, un siphon temporaire au bas de la salle Hydrokarst constitue comme une vanne pour le courant d'air qui vient des réseaux nord.

Peut-être plus spectaculaire encore, à la grotte du Pas de la Chèvre en Vercors (Rencurel, Isère), un siphon suspendu minuscule peut arrêter totalement le courant d'air de la cavité.

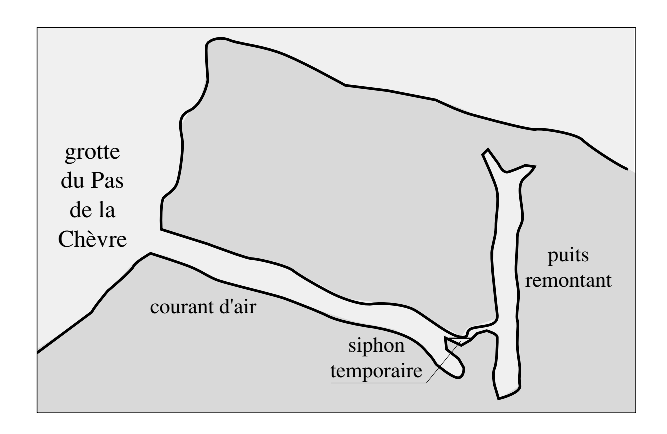


Fig. 1-2- Le siphon temporaire de la grotte du Pas de la Chèvre (Vercors, Isère) arrête le courant d'air

Air stream stopped by a temporary sump in the cave of Pas de La Chèvre

Ainsi, pendant les périodes pluvieuses, (l'hiver en général) la cavité est sans courant d'air, alors que ce dernier balaie la cavité pendant les périodes sèches. Et comme le fonctionnement de ce trou pour les courants d'air est déjà celui d'un trou à entrées multiples, cela rajoute à la complexité. Le courant d'air est, dans ce cas, un bon indicateur du niveau de sécheresse du secteur.

D'une façon analogue, la glace qui se forme l'hiver à une entrée basse aspirante d'un réseau peut obturer complètement cette entrée, interrompant le courant d'air. Ce cas s'est produit une fois en février vers 1985 au trou Qui Souffle de Méaudre. Le club de Fontaine la Tronche a dû procéder à un tir pour rouvrir le gouffre, très visité l'hiver.

1.1.4. Ouverture d'un siphon, courant d'air et modification du climat à Gournier

À la grotte de Gournier en Vercors, jusqu'en 1992, et cela depuis un temps assez long, il n'y avait qu'un faible courant d'air à l'entrée et le fond était verrouillé par un siphon (le siphon Jérôme). Toutes les tentatives pour shunter le siphon de +267 m, atteint par le Spéléo Club de la Seine, avaient échoué. Pour aller voir la suite, il fallait devenir plongeur (Spéléo Club de Lyon, Spéléo Club de Dijon). Mais Michel Colliard ne l'entendait pas ainsi. Il s'intéressait en effet à la grotte depuis 1972 et n'étant pas plongeur, il a décidé de descendre le seuil du siphon pour le désamorcer. Trois années de travail à la perceuse électrique alimentée par un groupe électrogène, lui permirent, à lui et à ses associés, de désamorcer le siphon. C'est un bel exploit qui permit une reprise des explorations et offrira sans doute une liaison avec le plateau. D'ailleurs cette liaison est démontrée par le violent courant d'air de 2 à 3 m³/s qui s'est alors amorcé.

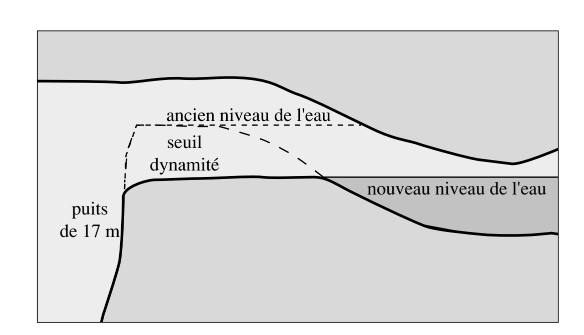


Fig. 1-3- Le désamorçage d'un siphon à Gournier (Isère) a modifié le climat de la grotte

The nowered unprimed sump of Gournier has altered the cave climate

Quelles sont les modifications que cela va apporter au climat de Gournier ? Du point de vue des températures, l'entrée basse va se refroidir puisque le courant d'air qui y pénètre est toujours plus froid que la moyenne annuelle. Cela devrait se faire sentir sur 1 km environ. La présence du lac devrait limiter cet effet qui ne sera gênant pour les spéléos que lorsque le dôme stalagmitique au dessus du lac sera verglacé.

Un deuxième effet, peut-être plus important pour ses conséquences à long terme, est la modification de la teneur en CO_2 de la cavité. L'absence de courant d'air et le dépôt de tuf dans les cascades sous l'entrée laissent penser que la concentration en CO_2 de l'air de la grotte devait être plus importante qu'à l'extérieur. Le débit de courant d'air de 2 m³/s amène au bout d'une journée 160 000 m³ d'air extérieur. Si l'on suppose le volume d'air de l'ordre de 2 millions de m³, il sera

renouvelé en moyenne au bout de 15 jours. La concentration en CO_2 va diminuer. Le concrétionnement dans la grotte augmentera, mais le dépôt de tuf à l'extérieur s'arrêtera et peut être même assistera t-on à une corrosion (cf. § 1.11.3). Mais il ne faut pas s'inquiéter outre mesure. Du courant d'air, il y en a déjà eu (cf. § 1.11.7) et les effets chimiques ne se feront sentir qu'à long terme.

1.2. Effet de cheminée dans les cavités à deux entrées

1.2.1. Un tube à vent classique, la traversée du Grand Marchet en Vanoise

La traversée spéléologique entre la perte du cirque du Grand Marchet en Vanoise et la résurgence du même nom constitue un magnifique tube à vent (Lavigne, 1978). Au moment des grands froids, quand le débit de l'actif est négligeable, le système fonctionne en tube à vent avec effet cheminée. L'air de la cavité est plus chaud que l'air extérieur. Cet air plus chaud «a tendance à monter» comme dans le tirage d'une cheminée dont l'air est chauffé par le feu. Ici c'est la cavité qui chauffe l'air. L'été, on s'attendrait à avoir un courant d'air descendant pour la raison symétrique.

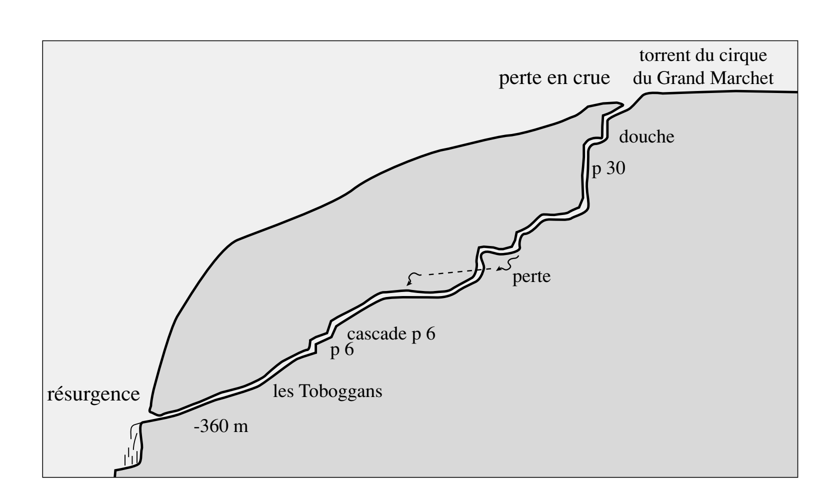


Fig. 1-4- La traversée du Grand Marchet, en Savoie

Chimney effect in the through cave of Grand Marchet

Mais la présence d'un actif dans la grotte apporte la perturbation d'un entraînement de l'air par l'eau. En été, l'eau de fonte du glacier chasse l'air. Le trou est impraticable, des siphons s'amorcent : il n'y a plus de courant d'air. Ainsi, même pour ce réseau qui passerait pour un prototype de tube à vent, des complications apparaissent. Il n'y a pas de réseau simple.

1.2.2. Un record de vitesse à la grotte de Pinargözü en Turquie

La grotte de Pinargözü s'ouvre dans le sud du Taurus en Turquie. Les dénivellations possibles dépassent les mille mètres et les explorations n'en sont qu'au commencement. Michel Bakalowicz a mesuré en 1970 dans cette grotte une vitesse de 166 km/h au niveau d'un rétrécissement de la galerie en forme de Venturi, c'est à dire un convergent suivi d'un divergent (Bakalowicz, 1972).

Il a relevé les températures extérieures et la vitesse du courant d'air à différents instants de la journée (le 11 août 1970). On remarque sur le graphique que la vitesse suit les variations de la température. Plus l'écart des températures entre l'extérieur et la cavité est grand, plus la vitesse est grande. Mais il apparaît un déphasage temporel. La vitesse présente un maximum en retard d'environ 2 h sur le maximum des températures. Nous essayerons de comprendre cela dans le tome 2, partie 3.

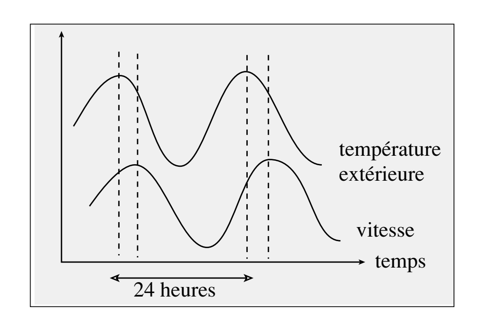


Fig. 1-5- Courant d'air au Pinargözü en fonction de la température extérieure

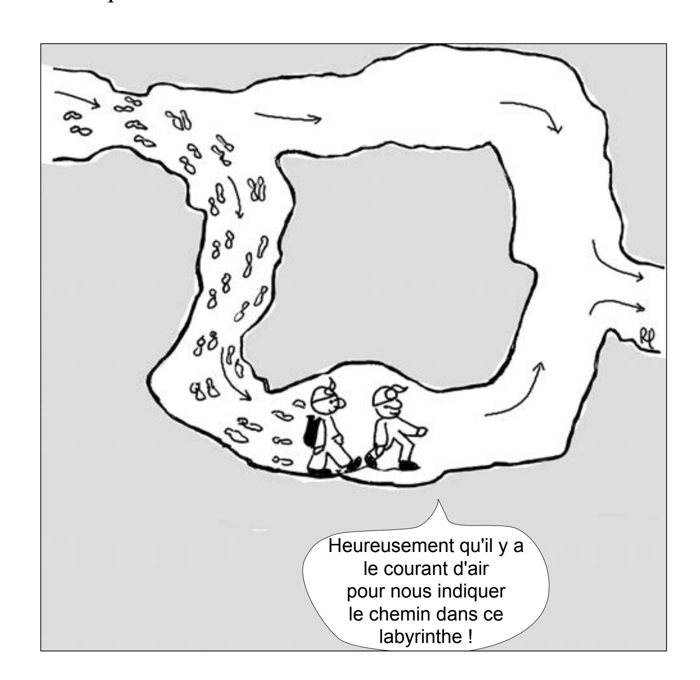
Air velocity versus external temperature in Pinargözü cave

En France, un courant d'air très violent existerait dans la chatière terminale impénétrable de la grotte de l'Ermoy en Haute Savoie (renseignement Bernard Lips). La dénivellation avec le réseau de la Combe aux Puaires explique facilement la violence de ce courant d'air qui resterait à mesurer.

1.2.3. Retournement brutal d'un courant d'air à la cueva Coventosa (Espagne)

Cela se passait dans les Cantabriques le 26 mai 1979. Le SGCAF avait réussi la jonction entre le gouffre du Juhué et une galerie de la grotte au-dessous, la cueva Coventosa. Et c'est ainsi que nous inaugurions la traversée. À un certain moment, nous nous sommes trouvés un peu plus loin que la jonction, en terrain inconnu pour nous, dans une espèce de labyrinthe de petites galeries qui constitue le réseau du Trou Souffleur exploré par le Spéléo Club de Dijon. Heureusement, le courant d'air omniprésent nous servait de guide, comme d'habitude.

C'est alors qu'il s'est inversé à l'insu de tous. Au carrefour suivant, nous avons continué à suivre le courant d'air. Il nous a fait emprunter une galerie parallèle à celle que nous suivions et nous a fait revenir en arrière. Puis, les deux galeries n'en faisant plus qu'une, nous revenions carrément sur nos pas. Un peu plus loin, l'un d'entre nous fut pris d'un doute, reconnaissant un passage. Pendant un moment, nous fûmes totalement désorientés, ne sachant plus à quel guide nous vouer. Puis nous comprîmes ce qui venait d'arriver et nous continuâmes la progression, fort méfiants pour le courant d'air qui s'était amusé de nous.



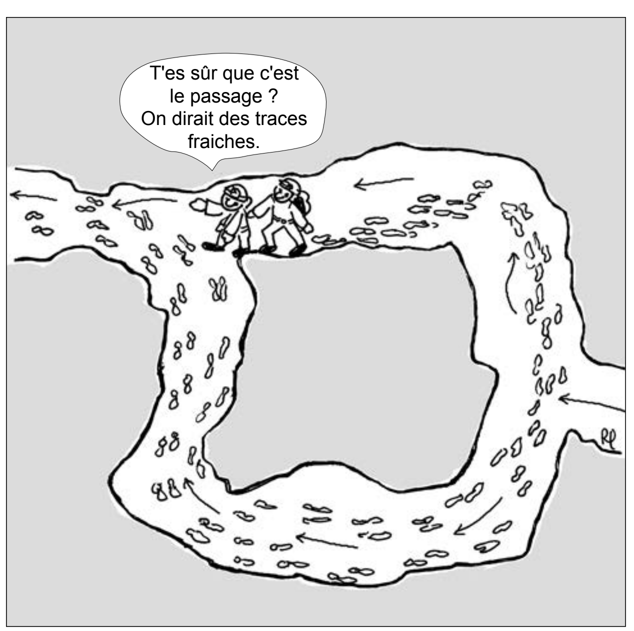


Fig. 1-6-a et 1-6-b- Vision humoristique de l'aventure à la Coventosa (par Régine Landry).
Les spéléos ont été abusés par la renverse du courant d'air !

The cavers are confuded by the air current inversion

1.2.4. Courant d'air alternatif au Clos de Fayoun (Var)

Le 6 août 2001, nous étions quatre à descendre dans le gouffre du Clos de Fayoun sur le Petit Plan de Canjuers dans le Var (Yannik Zanardi, Nathalie Payet, François Landry et moi). L'objectif était de trouver la suite du courant d'air qui parcourt la cavité. L'objectif n'a pas vraiment été atteint car le courant d'air entrant dans la salle de la Pluie à -125 m continuait dans la galerie des Aixois, mais à l'arrivée dans la salle des Aixois, il avait presque disparu (débit passant de 80 l/s à 15 l/s) et nous n'avons pas trouvé où il s'échappait. En revanche, nous avons assisté au niveau de la chatière en dessous de la salle de la Pluie à une magnifique oscillation du courant d'air.

Le courant d'air passait d'un régime aspirant à un régime soufflant d'une manière assez irrégulière mais avec une récurrence de l'ordre de la minute. Le phénomène était parfaitement net car les maxima du courant d'air dépassaient 1 m/s dans un sens ou dans un autre.

Le phénomène est sûrement à relier au fort vent du nord qui soufflait par rafale avec une périodicité analogue à celle du courant d'air dans le gouffre. Les rafales étaient de l'ordre de 10 m/s. Mais comment ce vent pouvait-il contrecarrer le courant d'air normalement aspirant du gouffre en cette saison ? On peut penser que les réseaux situés à -110 au Clos de Fayoun, de même que ceux à la cote -80 m de l'aven de l'ormeau, sont connectés avec un orifice situé dans les falaises des gorges du Verdon à 2,5 km au nord. Le vent du nord venait alors exercer une surpression sur l'entrée inférieure du système, arrêtant et même inversant le courant d'air dans le réseau.

Cette observation permet aussi d'estimer la résistance aéraulique des galeries à parcourir (on verra comment la déterminer dans le § 3.3.1). On trouve que la résistance de la chatière est seulement 1/100 de la résistance totale. On voit ainsi que la jonction avec la falaise est assez problématique …

1.3. Cavités à plusieurs entrées

1.3.1. Diffluence de courant d'air au gouffre de la Limande (Parmelan)

La grotte de la Diau possède 6 entrées supérieures et fait 31 km de développement. Une des entrées supérieures, le gouffre de la Limande, située 600 m plus haut que la grotte, possède une galerie amont qui se dirige vers le grand réseau de Bunant qui développe, quant à lui, 25 km. Les deux réseaux de la Diau et de Bunant sont parallèles, espacés d'environ 2,5 km. Une jonction entre les deux réseaux est bien sûr ardemment convoitée mais pas encore réussie en 2001. Le gouffre de la Limande est bien placé pour cela. En effet, à l'extrémité amont de ce gouffre, on rencontre un étonnant phénomène de limite de bassin versant et de diffluence de courant d'air.

Le méandre distributeur amène un courant d'air de 2 m^3/s à l'amont du gouffre de la Limande, mais il en amène aussi 0,4 m^3/s dans une faille dirigée vers le gouffre des Mutants dont le courant d'air est soufflant et qui appartient au système de Bunant. Au même endroit, sur une distance de quelques dizaines de mètres, on peut voir le ruisselet du méandre distributeur partir vers la Diau et le ruisselet du puits suivant partir en sens opposé, vraisemblablement la résurgence de Bunant. Une coloration pourrait démontrer cela. Les spéléos ont donc réussi à dépasser le seuil, séparateur des deux bassins versants.

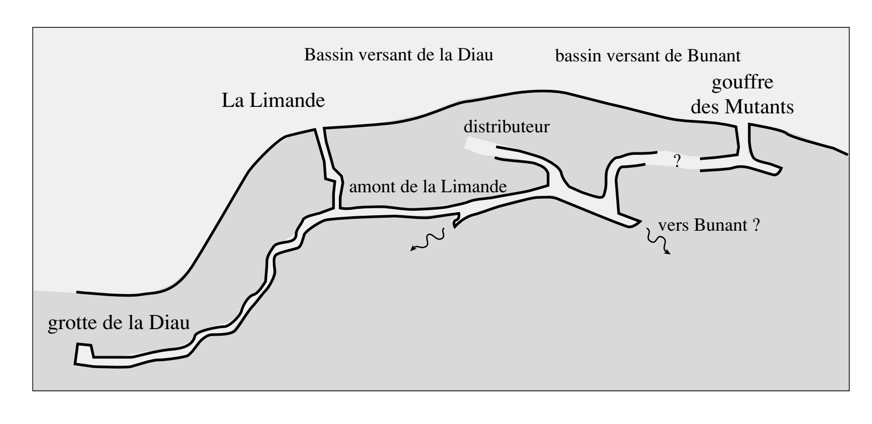


Fig. 1-7- Diffluence de courant d'air à la Limande, d'un côté vers la Diau, de l'autre vers Bunant

Air diffluence in the Limande pot between the Diau and Bunant

---

1.3.2. Une «entrée supérieure» bien curieuse à la grotte de Préou (Ain)

Le club d'Hauteville-Lompnes explore la grotte de Préou depuis quelques années. Elle est située à Ruffieu-en-Valromay dans l'Ain. On pénètre dans le réseau par un trop plein. Le courant d'air est nettement aspirant l'hiver. Après de nombreuses escalades en suivant le courant d'air, les spéléos se sont rapprochés de la surface à tel point, que pendant l'hiver 1992-93, un repérage magnétique (par molefone) a permis de localiser le point haut à seulement 16 m sous la surface.

Un chantier très difficile fut entrepris par le club de l'Ain et la ténacité des spéléos vint à bout de l'obstacle. Une jonction fut établie avec le réseau sous-jacent. Logiquement, nos spéléos s'attendaient à trouver un courant d'air hivernal montant, donc soufflant. Mais le courant d'air qui s'est amorcé était aspirant comme l'entrée basse. La grotte ne fonctionne pas en simple tube à vent. La raison est la présence probable d'une troisième entrée encore plus haut et qui joue le rôle de trouble fête.

Les spéléos ont ainsi pu savoir qu'une galerie leur avait échappé, galerie qui emportait tout le courant d'air (en cours d'exploration en 1999).

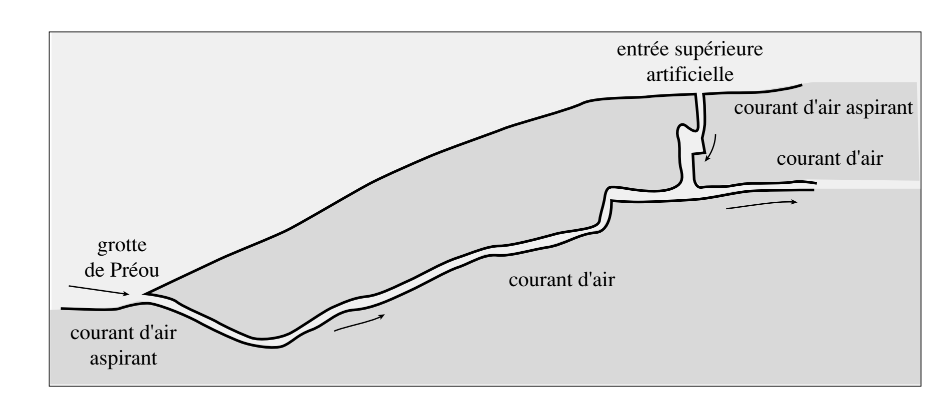


Fig. 1-8- Traversée à la grotte de Préou, l'entrée supérieure n'en est pas une pour le courant d'air.

A false upper entrance of cave crossing of Préou

1.3.3. Difficulté d'équilibrer un bilan des courants d'air à la Dent de Crolles

La Dent de Crolles possède de multiples entrées. À un moment donné, certaines sont aspirantes, d'autres sont soufflantes. Il est naturel de penser que l'air qui entre dans le réseau sortira un peu plus tard par un autre orifice. L'air ne fait que passer. Les gouffres ne sont pas des accumulateurs d'air, mais de simples tubes. Avec cette idée là, qui est vraie la plupart du temps, la somme des débits entrants devrait être égale à la somme des débits sortants.

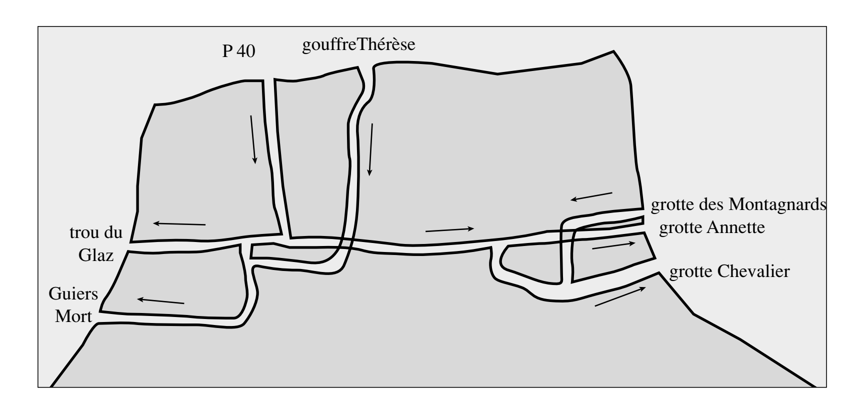


Fig. 1-9- Bilan des courants d'air à la Dent de Crolles : plus de courants d'air soufflants qu'entrants

Bad air flow balance in the Dent de Crolles system

Le 18 août 1993, la température extérieure était de 17°C à 20°C suivant les entrées. Les courants d'air se présentaient ainsi (cf. Lismonde et al, 1997) :

courant d'air soufflant 15,4 m³/s se répartissant ainsi :

trou du Glaz	1,2 m³/s
grotte Chevalier	2,8 m³/s
grotte Annette	1,4 m³/s
grotte du Guiers Mort	10,0 m³/s

courant d'air aspirant		0,9 m³/s se répartissant en :
	P 40 (à 100 m)	0,7 m³/s
	gouffre Thérèse (à l'entrée)	0,2 m³/s
	grotte des Montagnards	non mesuré

Même en supposant un courant d'air aspirant de 1 m³/s à la grotte des Montagnards (en pleine falaise), on est loin de pouvoir faire un bilan équilibré des courants d'air à la Dent de Crolles, c'est à dire trouver autant de courant d'air aspiré que de courant d'air soufflé.

On peut invoquer plusieurs raisons pour justifier cet échec. Les trous souffleurs sont plus faciles à détecter que les aspirateurs. Les trous aspirateurs sont situés sur le plateau de la Dent de Crolles qui est lapiazé et relativement ouvert. Plusieurs gouffres sont parcourus par un courant d'air et leurs jonctions non encore réussies avec le reste du réseau. Toutes ces raisons sont bonnes. Néanmoins, qui aurait pu penser que les débits entrants mesurés ne constitueraient que 1/20 des débits sortants ?

1.3.4. Bilan partiel pour la zone d'entrée de Niaux fait par C. Andrieux

Claude Andrieux (Andrieux, 1983) a procédé à une multitude de mesures dans le cadre de la conservation des peintures de la galerie Clastres à la grotte de Niaux. Il n'a pas essayé de faire un bilan pour l'ensemble du réseau qui comporte plusieurs entrées : Niaux, Lombrives, Sabbart, gouffre Martel..., mais il a vérifié l'étanchéité de la galerie d'entrée de la grotte de Niaux.

Pour cela il a effectué des mesures de débit aux trois points : A, l'entrée naturelle de Niaux, B, le tunnel d'accès ouvert par le CNRS, et C la Porte Rouge placée dans un resserrement de la galerie. Il a constaté qu'en période normale, on ne pouvait pas équilibrer les bilans entre ces trois points. Le courant d'air est faible à la Porte Rouge. Il y a donc une entrée inconnue plus haut dans la montagne. En revanche, au cours d'épisodes pluvieux particulièrement intenses, il a constaté que le bilan était équilibré. Il est donc facile d'en conclure, qu'un siphon s'amorce dans la branche inconnue.

La grotte de Niaux est une entrée intermédiaire en ce qui concerne les orifices connus. Les dénivellations entre les entrées basses étant faibles, il n'est pas étonnant que le débit dans la section C soit faible. En ce qui concerne le réseau supérieur inconnu des spéléos, le fonctionnement semble celui d'un tube à vent ordinaire.

Le bilan partiel établi par Claude Andrieux montre qu'un orifice supérieur parcouru par un gros courant d'air (plusieurs mètres cubes par seconde) reste à trouver dans cette montagne de l'Ariège. C'est justement un des objectifs de cet ouvrage-ci de montrer que l'étude des courants d'air peut conduire à des découvertes spéléologiques !

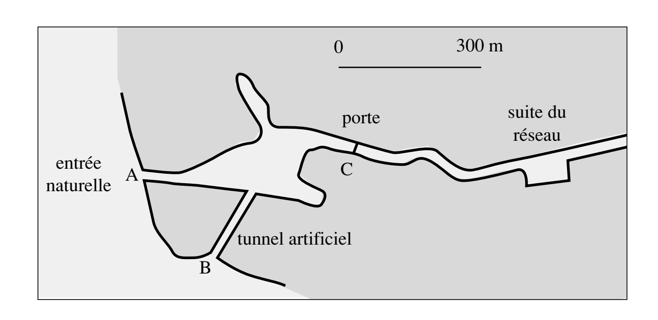


Fig. 1-10- Disposition de l'entrée de la grotte de Niaux

Plan of entrance of Niaux cave

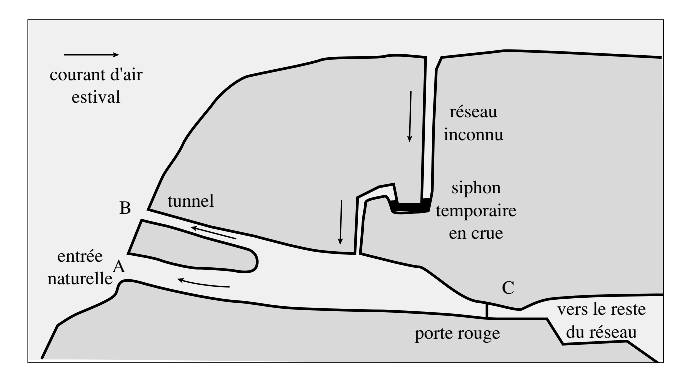


Fig. 1-11- Fonctionnement possible du courant d'air à Niaux

Possible configuration of air flow in Niaux cave

1.4. Grottes à une seule entrée

1.4.1. Courant d'air dans les baumes de pied de falaise

Les courants d'air près des falaises sont commandés par la différence des températures entre l'air et la roche. Au soleil, la roche s'échauffe plus que l'air et une cellule convective se développe au contact de la roche faisant monter l'air au contact de la paroi à la verticale. Ce panache continue sa route au-dessus de la falaise et peut amorcer un nuage du genre cumulus. Ce sont les fameuses «thermiques» chères aux amateurs de vol libre (Aupetit, 1999).

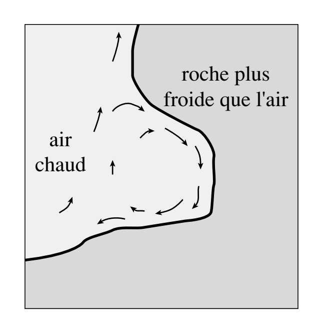


Fig. 1-12- Courant d'air de convection en pied de falaise pendant la journée

Thermal convection at the bottom of the cliff

Le sens de circulation est inversé si la roche est plus froide que l'air. Ce dernier cas surviendra, par exemple, la nuit par un ciel bien dégagé. En effet, la roche possède une émissivité bien supérieure à l'air (cf. tome 2 § 1.4.6.a). Le refroidissement par rayonnement thermique de la surface solide sera donc bien plus rapide que celui de l'air, relativement transparent et inerte au rayonnement.

Une baume constitue un recoin peu ensoleillé. La roche reste froide et l'air pendant les périodes chaudes de la journée a donc tendance à descendre le long de la roche. La nuit, le courant d'air s'inverse.

1.4.2. Courant d'air dans un piège thermique : la grotte Roche (Vercors)

Les cavités en pente et à une seule entrée constituent des pièges thermiques (Choppy, 1985). Présentons le cas de la grotte Roche dans les gorges de la Bourne en Isère qui est un piège à air chaud. La visite de la grotte en été (25 juillet 2001) montrait une cavité parcourue par un bon courant d'air descendant et plus froid que l'air extérieur (supérieur à 1 m³/s). La hauteur du plafond à l'entrée ne permettait pas de vérifier que le courant d'air était aspirant à la voûte. Vers le haut de la grotte, une intense condensation faisait dégoutter les parois et les voûtes.

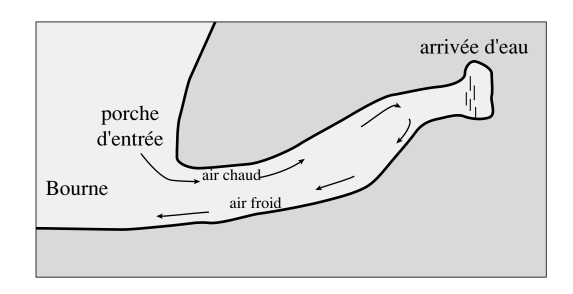


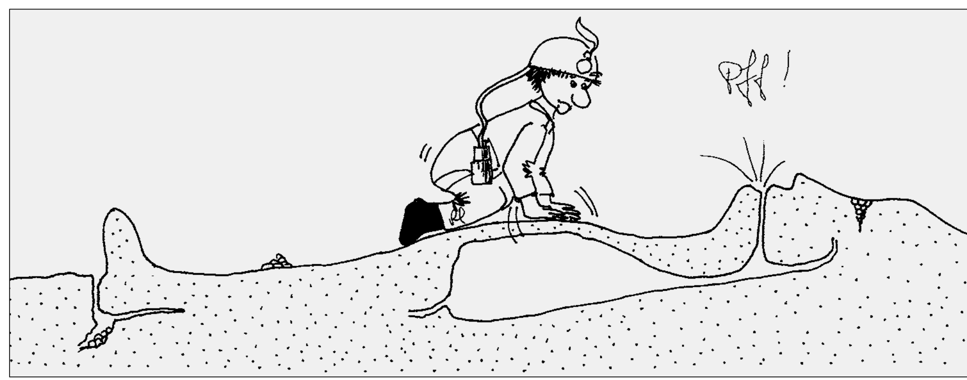
Fig. 1-13- Courant d'air l'été dans la grotte Roche, un piège à air chaud (gorges de la Bourne, Isère)

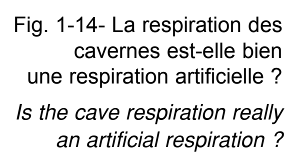
Summer air flow in the Roche cave, a warm air trap

En hiver, il n'y a pas de courant d'air mais la grotte paraît anormalement chaude et confortable (+ 8°C mesurées en haut de la salle alors qu'il gelait à l'extérieur). Les hommes préhistoriques qui utilisaient les cavernes du Vercors comme abri de chasse devaient connaître ces propriétés.

1.4.3. Respiration de la caverne de Jewell cave (Dakota du Sud)

Herbert Conn a étudié avec passion les réseaux géants de Jewell cave et Wind cave dans le Dakota du Sud aux US. Ces réseaux font respectivement 123 km et 82 km de développement (Courbon et al 1989). Leur genèse hydrothermale a favorisé un grand volume de cavernement. Dans un article de 1966, Conn présente les observations qu'il a faites à l'entrée de ces réseaux. Lorsque la pression atmosphérique chute, les gouffres soufflent. Lorsque la pression atmosphérique augmente, les gouffres aspirent. L'explication est assez simple à comprendre. L'air est un fluide compressible, une diminution de la pression extérieure se traduit par une diminution de la pression intérieure. Le volume d'air occupé augmente donc et comme la grotte est incompressible, une partie de l'air s'échappe à l'atmosphère par les entrées (à cause de la surpression momentanée).




Fig. 1-14- La respiration des cavernes est-elle bien une respiration artificielle ?

Is the cave respiration really an artificial respiration ?

dessin Régine Landry

Ce processus est alterné, les grottes aspirant ou soufflant plusieurs fois par semaine au gré des fluctuations de la pression atmosphérique. Cela évoque la respiration d'un être vivant, d'où le nom. Mais à regarder de plus près, cette respiration-là est plutôt une respiration artificielle !

1.5. Stratification et effets thermiques

1.5.1. Observation d'un «torrent d'air» en extérieur. Mort Ru et Cañuela

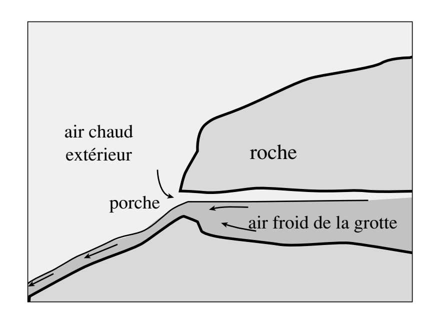


Fig. 1-15- Le torrent d'air à la sortie de la Cañuela, un effet de la stratification

«Air river» at the exit of Cañuela cave, a stratification effect

Il y a fort longtemps, vers 1971, je recherchais en Chartreuse, l'entrée de la grotte du Mort Ru que je ne connaissais pas encore. La recherche dans la pente boisée, raide et glissante n'était guère commode et cela faisait une heure que je patrouillais sans succès avec ma femme. Pourtant un fait vint m'apporter une aide précieuse. En traversant un talweg à sec, je sentis nettement un souffle froid sur le visage. Regardant vers le haut, j'eus tôt fait de voir le porche d'entrée de la grotte convoitée. L'air froid que la caverne exhalait, descendait la pente comme l'aurait fait un cours d'eau et je venais de traverser ce torrent d'air.

On peut faire une observation équivalente au porche de la cueva Cañuela en Espagne (Socueva, Cantabria). Le débit d'air est considérable, une trentaine de mètres cubes par seconde. La pente au dessous du poche est herbeuse et une sorte de talweg canalise le torrent. À cinquante mètres du porche, on sent très nettement non pas la vitesse de l'air mais la différence de température quand on pénètre dans la masse d'air froid. Sur les bords, la turbulence de la zone de mélange se manifeste par le passage de paquets d'air tiède alternant avec de l'air glacial. À travers cet air, les images sont floues et vibrent comme au-dessus d'une route surchauffée.

Pour que ce phénomène puisse se produire, il faut que l'air qui sort du trou soit plus froid que l'air extérieur, c'est à dire qu'on soit en régime estival, au point bas d'un système à plusieurs entrées. L'air froid est plaqué au sol par la pesanteur. Mais contrairement à un cours d'eau où le débit reste sensiblement constant, ici le débit entraîné augmente dans la descente car le fluide froid refroidit l'air ambiant et l'entraîne dans son mouvement. Cependant, la différence des températures diminue et bientôt le phénomène s'arrête. Probablement, la longueur atteinte par ces «courants de densité» doit augmenter avec le débit initial. Si le débit est important comme à la Cañuela (40 m^3/s, l'écoulement est assez turbulent et la limite entre l'air froid et l'air chaud est très sensible, au moins au début.

1.5.2. Torrent d'air dans les cavités. Cueva Cañuela

Dans une cavité, les conditions pour observer un torrent d'air sont plus rares. Il faut que deux masses d'air de températures (donc d'origines) différentes se rencontrent. Là encore, l'air le plus froid doit arriver en bas. À l'intérieur de la grotte de la Cañuela, on peut observer ce phénomène. La salle Guillaume est une énorme salle, de 300 m de long et 50 à 100 m de large, fortement déclive. Vers le haut de la salle et au niveau du sol, la galerie Tantale amène un débit d'air de quelques mètres cubes par seconde. Cet air qui a suivi un long parcours souterrain a une température constante. La salle Guillaume est percée au plafond par des orifices en communication avec le plateau sus-jacent. En été, ces trous aspirent fortement (comme la sima Tonio) et l'air débouche dans la salle sans être totalement refroidi (plusieurs mètres cubes par seconde). Il se produit une forte stratification, l'air froid est plaqué au sol et coule dans un talweg sec du gigantesque éboulis. On peut sentir le torrent très facilement, comme à l'extérieur. Là encore, il est net au début de la pente, puis il disparaît plus bas. En hiver, le phénomène ne s'observe pas, comme on pouvait le prévoir.

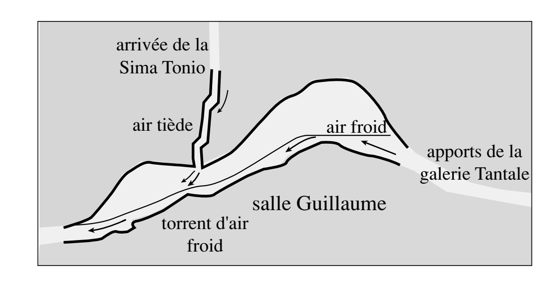


Fig. 1-16- Écoulement «torrentiel» de l'air dans la salle Guillaume

Supercritical statified air stream in the bottom of Guillaume room of Cañuela cave

---

1.5.3. Courant d'air cutané au S13 à l'Aup du Seuil en Chartreuse

À l'Aup du Seuil, en Chartreuse, se trouve un petit réseau cutané dont l'exploration a commencé avec les Chambériens et qui a été poursuivi depuis par les FJS et B. Loiseleur.

Quand j'ai visité ce réseau le 4 juillet 1993, il régnait à l'extérieur une température d'une vingtaine de degrés Celsius, l'altitude est de 1500 m environ, et les courants d'air souterrains sont en général très froids, 2 ou 3 degrés. Le courant d'air glacé (100 l/s) provient d'un amont encore inconnu. Il entre dans le réseau par une trémie en A, passe à l'aplomb du gouffre B, et sort en partie par la fissure C. Ce qui reste (70 l/s) passe une chatière et récupère au passage à l'aplomb de D un débit de 50 l/s, puis il poursuit dans un méandre très étroit et sort au fond d'une énorme doline de 30 m de diamètre. Dans la partie connue, la dénivellation ne doit pas dépasser 10 m. On assiste là à un écoulement presque analogue à un écoulement de pente, à la différence que l'air froid qui descend n'est pas réchauffé par l'air ambiant et peut donc continuer son chemin sous la surface du lapiaz sans être perturbé par le soleil.

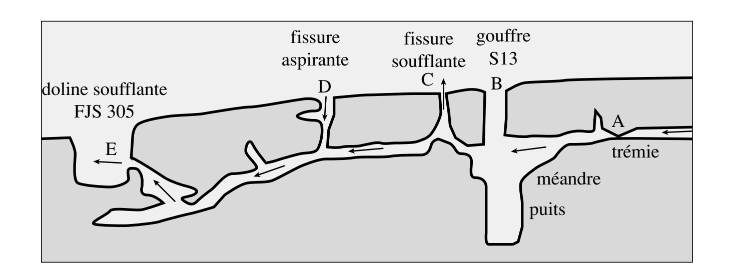


Fig. 1-17- Un courant d'air de surface au S13. Il reste à proximité de la surface et semble peu pressé de sortir

A superficial air flow in the S13 pot

On voit bien par là que le voisinage de la surface des lapiaz est plus facilement ventilé que les réseaux profonds. Les réseaux cutanés ont un climat variable, intermédiaire entre celui de l'atmosphère extérieure et celui beaucoup plus constant des réseaux profonds.

1.5.4. Un aspirateur bien froid, le S34 au dessus du Mort Ru

Le Mort Ru est une grotte qui crache un violent courant d'air glacé en été. Les entrées supérieures, quant-à-elles, aspirent l'air extérieur tiède. En général, cet air chaud réchauffe le gouffre absorbant. Il y a formation de brouillard et de l'eau de condensation (Sima Tonio au dessus de la Cañuela...). Mais au S 34 la situation est tout-autre.

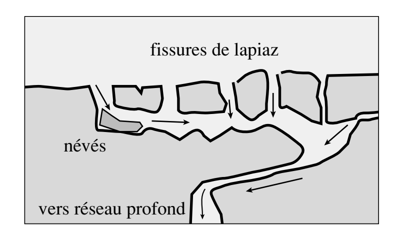


Fig. 1-18- Courant d'air collecté en été sous les lapiaz glacés du S34
Air flow collecting in the summer under cold limestone rock rillers near the S34 pot

La cavité se présente comme une fracture bien ouverte sur une centaine de mètres plus ou moins remplie de neige qui subsiste presque toute l'année. À la profondeur de 10 mètres, la roche sans doute plus tendre ou gélive a été évidée et un méandre part et s'enfonce dans les profondeurs vers le Mort Ru. Un courant d'air de 200 l/s balaye le méandre (ouvert à coup de dynamitage). Si près de la surface, on s'attendrait à un courant d'air encore tiède. Il n'en est rien. L'air qui s'engouffre dans les profondeurs est glacé, la glace à l'entrée n'est pas encore fondue au mois de juillet. Ce refroidissement de l'air est dû au réseau cutané en connexion avec le méandre aspirateur.

L'air chaud pénètre par toutes les fissures à très basse vitesse. La surface de contact est très grande, les temps sont aussi très grands. L'air chaud prend donc la température des crevasses englacées. C'est cet air froid qui pénètre dans le méandre. Le courant d'air en l'absence d'effet thermique devrait venir de l'entrée du S34 (perte de charge minimale) mais cet air chaud est moins dense que celui qui stagne dans le fond des crevasses. C'est ce dernier qui descend le méandre, réfrigérant le spéléo (occupé à agrandir le méandre).

Cet effet est très important. Il montre l'importance du rôle des courants de densité. L'air chaud de l'extérieur ne peut pas descendre directement par les conduits les plus importants. Il fait un détour obligé par le réseau cutané. De même, à une entrée basse comme celle du Mort Ru, l'air froid ne peut pas monter directement dans la salle d'entrée vers les réseaux supérieurs. L'air froid remplit d'abord la salle et ce qui monte, c'est un air réchauffé partiellement au contact des parois.

On voit qu'il existe un mécanisme efficace pour mettre un courant d'air rapidement dans les conditions thermiques des réseaux profonds. Ce mécanisme, on peut l'appeler stratification thermique de l'air.

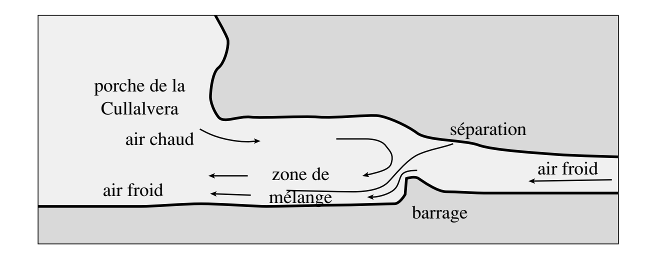
1.5.5. Une curieuse stratification d'un courant d'air à la cueva Cullalvera à Ramales

C'est un phénomène un peu analogue que l'on peut observer à la cueva Cullalvera située à Ramales, province de Santander en Espagne. En été, le porche d'entrée crache un bon courant d'air froid. Mesurant la vitesse du courant d'air au niveau du sol et estimant le débit d'après la hauteur du porche, je trouvais un débit faramineux. Comme on ne retrouve pas ce débit un peu plus loin dans des galeries plus petites, j'ai été pris d'un doute et de retour au porche j'ai entrepris d'escalader la paroi pour voir si la vitesse en hauteur était comparable à celle en bas. J'ai été fort surpris de voir que la vitesse était inversée et que le courant d'air entrait dans la grotte. Il y avait là un magnifique exemple d'inversion du sens du courant d'air grâce à la stratification thermique (cf. § 2.K-23).

L'air du fond, plus froid arrive au niveau d'une sorte de barrage et déverse par dessus en coulant au bas de la galerie. L'air extérieur, profitant de la hauteur du porche, entre au plafond et redescend au niveau du barrage où il est entraîné vers l'extérieur par l'air froid qui le refroidit et l'oblige donc à rester au voisinage du sol. On en déduit que le courant d'air sortant est augmenté (du débit correspondant au courant d'air chaud entrant) et que la vitesse au voisinage du sol n'a rien à voir avec une vitesse de débit (vitesse moyenne).

Fig. 1-19- Courant d'air complexe à l'entrée de la Cullalvera, mélange d'un tube à vent et d'une convection

Intricate air flow at the entrance of Cullalvera cave. Hybrid flow of convection and chimney effect



Cette observation soulève d'intéressantes questions. Si le conduit était petit, le courant d'air serait uniquement soufflant. C'est donc la grande taille de l'ouverture qui permet l'inversion du sens de la vitesse de l'air dans le porche. Mais quels sont les critères pour prévoir quantitativement le phénomène. On verra une amorce de réponse dans le tome 2 (§1.4.5), mais une étude reste tout de même à mener sur le problème …

1.5.6. Champ des vitesses au porche d'entrée du Mort Ru

Le porche de la grotte du Mort Ru est un point bas, et il souffle en été un courant d'air glacé issu de l'énorme salle d'entrée. Pourtant, une mesure des vitesses le 14 juillet 1990, un jour de canicule, a montré que le courant d'air n'est pas aussi simple qu'on pourrait penser (Lismonde, 1990b). En effet, au plafond du porche, heureusement pas trop haut, on constate que le courant d'air est aspirant, de sorte que la salle du Mort Ru est le siège d'un mélange d'air chaud extérieur et d'air glacé venant des entrées supérieures. La température du courant d'air soufflant (4,5 °C ce jour-là) résulte d'un mélange. Elle est plus élevée que la température profonde du réseau.

L'examen des débits : 15 m^3/s sortants et 1,6 m^3/s entrants, associés aux températures respectivement de 4,5°C et 24°C permettront au lecteur de trouver la température profonde (réponse : 2,17°C en supposant qu'il n'y a pas de condensation).

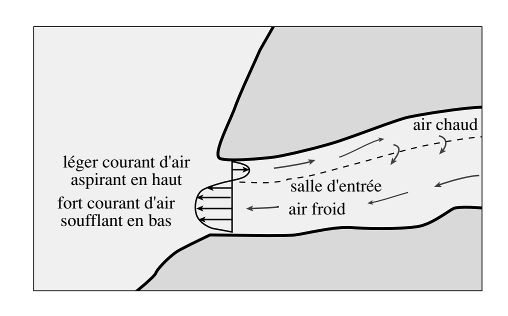


Fig. 1-20- Profils de vitesse à l'entrée du Mort Ru (Savoie).
Remarquer l'air entrant au plafond !

Velocity profile at the Mort Ru entrance. Convection and chimney effect

---

1.5.7. Un exemple surprenant de sens du courant d'air au Guiers Mort

La Dent de Crolles est un réseau à multiples entrées parcouru par un violent courant d'air. Les effets de mémoires dus aux échanges de chaleur entre le vent et les parois y sont particulièrement importants. Le 6 février 1995, à l'occasion d'une expédition dans le réseau Spit, nous avons parcouru une grande partie du réseau. À l'extérieur, la température était voisine de 0°C. L'entrée du Guiers Mort soufflait, comme en été (cf.aussi Lismonde et *al* 1997, p. 236). Cela nous a fort étonné car c'est le point bas du grand réseau et la température des galeries lointaines est de 4,6°C, le trou aurait dû être en régime hivernal. En continuant notre progression, nous nous sommes pourtant rendus compte que le réseau était globalement en régime hivernal. Mais alors comment le point bas pouvait-il souffler ?

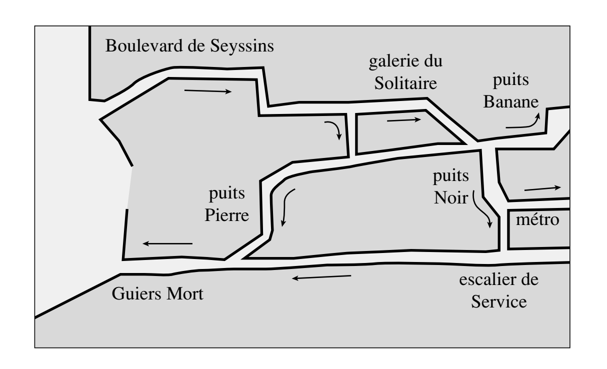


Fig. 1-21- Anomalie du sens du courant d'air au Guiers Mort en hiver (par un effet de mémoire)

Anomalous air stream direction in Guiers Mort cave in the winter (memory effect)

En examinant le schéma des courants d'air ce jour là, nous pouvons trouver une explication plausible à ce phénomène "anormal". Nous étions au mois de février, la température n'était pas très basse mais il avait fait plus froid dans les jours précédents. Le courant d'air froid avait envahi les réseaux inférieurs du Guiers Mort et avait englacé les parois et gelé les écoulements d'eau en fabriquant de magnifiques concrétions de glace dans la galerie d'entrée. La température moyenne du réseau inférieur était donc très froide, sans doute un peu inférieure à 0°C. Dans ces conditions, il était normal que le Guiers Mort fonctionne le 6 février en régime estival car à cette date, la température moyenne de cette partie était inférieure à la température extérieure.

Ici, on touche du doigt les limitations d'un modèle trop simpliste de tube à vent (basé sur une grande inertie du réseau). Dans les petites traversées ou dans des portions de grands réseaux, l'inertie thermique des parois est insuffisante pour assurer une

moyenne annuelle constante. Le fonctionnement d'un petit réseau est un système à mémoire : le courant d'air, un jour donné, dépend essentiellement de la température des semaines précédentes. On n'a pas de température moyenne du réseau. On n'a que des températures instantanées. On étudiera ces phénomènes en détail dans le tome 2, partie 3.

1.5.8. Courant de recirculation au puits de la Cote à la Dent de Crolles

Ce puits de 50 m relie l'étage de la galerie des Champignons au collecteur (galerie des François). Il est creusé dans une vaste diaclase de 25 m de long et s'évasant au milieu jusqu'à 10 m de large. Il est constitué en réalité de deux puits communicants en deux endroits. Le courant d'air qui descend dans le puits engendre une sorte de rouleau de convection. La présence d'un petit actif sur le côté du puits, si sa température est plus froide que celle de l'air doit favoriser ce phénomène. En tout cas c'est un débit de presque un mètre cube par seconde (vitesse de l'ordre de 20 cm/s) qui emprunte la fenêtre basse pour remonter à l'étage au dessus et être recirculé. Ce pouvait être l'indice d'une suite importante, aussi, sommes-nous venus spécialement pour examiner les suites possibles le 17 janvier 1999 (Éric Laroche-Joubert, Delphine Fabbri et moi). Avec son aisance coutumière, Éric Laroche Joubert a remonté complètement par le bas ce puits parallèle. Mais nous n'avons pas trouvé en hauteur le départ de galerie espéré. En revanche, nous sommes sortis dans la galerie de la Vierge par un petit soupirail, presque sans courant d'air, qu'Éric a ouvert au passage.

Le courant d'air est dû probablement à une différence de température entre la galerie de la Vierge (plus froide) et la galerie des François (plus chaude). Cette différence rendait l'air instable (convection) et le courant d'air descendant vers la galerie des François pouvait ainsi exercer un fort effet d'entraînement (recirculation).

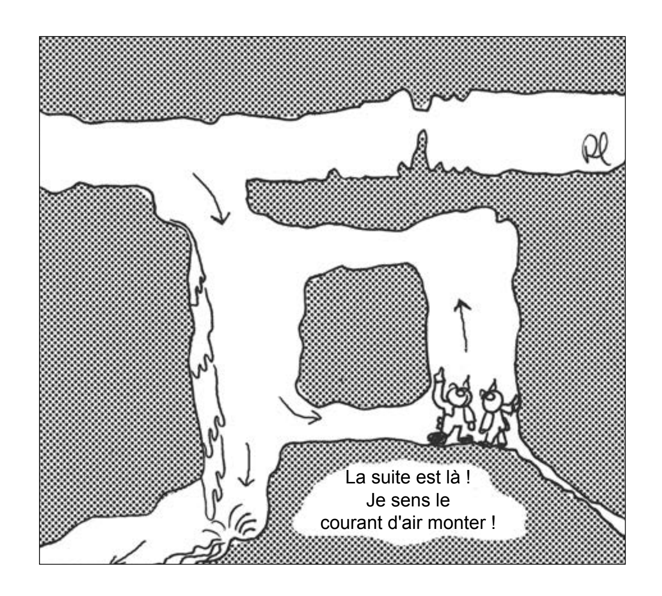


Fig. 1-22- Au bas du puits, espoir de première

At the bottom of pitch, hope of discovery

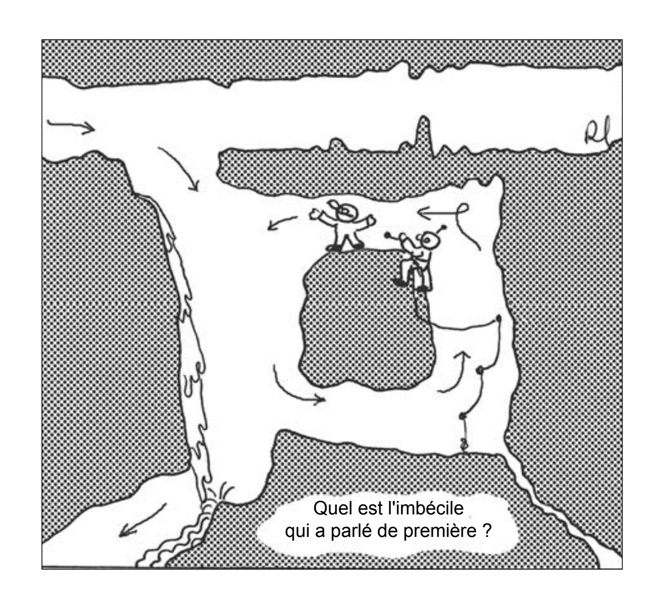


Fig. 1-23- Constatation de la recirculation

Disappointment at the top of pitch

La recirculation qui a berné les spéléos au puits de la Cote au Guiers Mort
(dessin Régine Landry)

Convection in the Cote pitch of Guiers Mort. The air flow here is not a good guide for new discovery

---

1.5.9. Un courant d'air à recirculation au trou des Flammes (observation de J.-L. Rocourt)

Le trou des Flammes est un gouffre du synclinal de l'Aup du Seuil en Chartreuse. Son exploration commencée par les Anglais du Whernside Manor a été poursuivie principalement par l'équipe de Jean-Louis Rocourt qui a réussi à déboucher dans la branche occidentale du collecteur du Guiers Vif. Plus tard, en 1992, un interclub anglais de plongeurs renforcés par Frédo Poggia a réussi la jonction avec la grotte du Guiers Vif.

L'entrée du gouffre, petite, est balayée en été par un fort courant d'air soufflant. On s'attendrait bien sûr à un courant d'air aspirant puisqu'il s'agit de l'entrée supérieure d'une traversée. Mais il ne faut pas oublier que le siphon de 200 m du Guiers Vif empêche le courant d'air de sortir facilement en bas. L'hiver, le courant d'air est aspirant, confirmant que le trou des Flammes fonctionne comme un point bas pour le courant d'air.

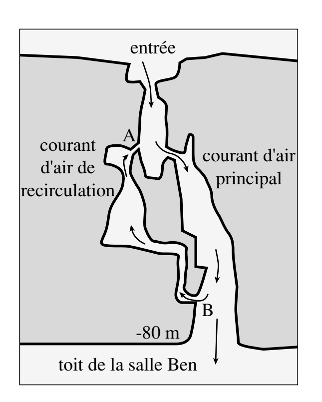


Fig. 1-24- Recirculation au trou des Flammes en hiver (Chartreuse)

A curious air flow loop in trou des Flammes in winter

Non loin de l'entrée, le réseau présente un réseau secondaire qui double le réseau principal sur un certaine hauteur. La fouille soignée de ce réseau parallèle, étroit et présentant une étroiture impénétrable (atteinte par les deux côtés) montre qu'il ne possède pas d'autre arrivée de courant d'air. L'été, le courant d'air venant du fond emprunte les deux itinéraires, mais l'hiver, le courant d'air, au lieu de descendre par les deux réseaux, emprunte seulement le réseau principal. Dans le réseau secondaire plus étroit, Jean-Louis Rocourt a observé une remontée de courant d'air qui ressort dans le réseau principal en effectuant une sorte de boucle fermée. Comme il a eu le temps de se réchauffer en remontant les passages étroits et qu'il s'est chargé en humidité, son mélange au point A avec le courant d'air glacé se traduit par une condensation et un givrage intense de la paroi.

Ce phénomène est très curieux et intéressant. Le givrage montre que le courant qui remonte n'est pas sec et s'est donc chargé d'humidité (sans doute le suintement à la paroi). Le courant d'air froid suit le trajet le plus direct. C'est parce que le débit dans le trajet parallèle n'est pas important, que la paroi peut le réchauffer suffisamment pour lui permettre de remonter. Mais pourquoi cette dissymétrie entre l'hiver et l'été ? Il semble bien qu'on ait affaire à un piège à air froid relatif. Le piège à air froid n'est actif que l'hiver, ce qui est le cas ici. Là encore, il faudrait une analyse plus serrée pour comprendre qualitativement le phénomène (cf. tome 2, § 3.6.6).

Le choix du courant d'air d'emprunter le petit réseau à la montée plutôt que le réseau principal, est lié aux débits qui sont différents. Le grand débit dans le grand réseau.

1.5.10. Un courant d'air variable à l'Abélian (Parmelan)

L'Abélian est un gouffre de pente. Il est connecté avec une grotte du synclinal voisin (souffleur de Nerval). À -290 m, une galerie remonte vers le Parmelan. Il en descend un courant d'air de plus de 1 m³/s. Le gouffre Abélian se situe donc entre deux entrées, l'une plus haute (origine du courant d'air de l'affluent), l'autre plus basse. C'est une entrée intermédiaire dans le réseau.

Le vendredi 16 août 1996, le temps était beau (température environ 18°C à 1420 m). La descente dans l'Abélian montrait un fort courant d'air soufflant vers 11 h (c'est-à-dire remontant) de 200 l/s environ. Le soir à la remontée vers 21 h, le courant d'air était aspirant (descendant) et à peu près de même débit que le matin. À l'extérieur, il faisait environ 12°C, c'est-à-dire une température pour laquelle le régime de courant d'air aurait dû être estival.

On comprend que le courant d'air dans une entrée intermédiaire puisse être soufflant ou aspirant, mais pourquoi s'est-il inversé dans la journée ? On aura une vie plus précise du phénomène en examinant dans le tome 2 (§ 3.6) les déphasages aux entrées intermédiaires.

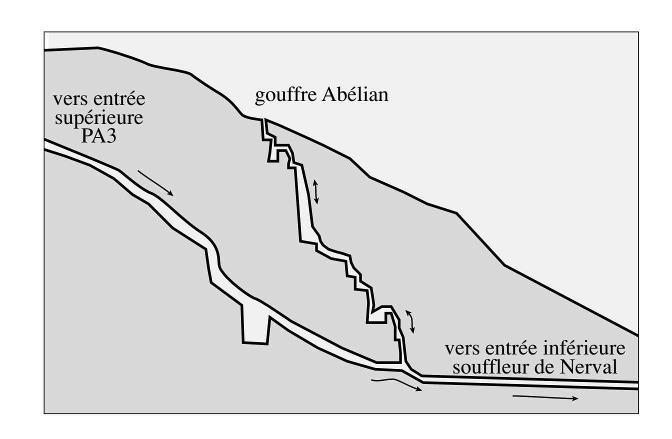


Fig. 1-25- Courant d'air variable à l'Abélian, qui est une entrée intermédiaire

Unstable air flow in Abelian pot, a middle entrance of the system

1.6. Englacement et fonte

1.6.1. La glace près des entrées des cavités

Dans de nombreux trous de montagne, on peut voir se former de grandes quantités de glace en plein hiver. Il ne s'agit pas des névés qui se forment au fond des gouffres et qui se transforment en glace, mais de la glace qui se forme directement à partir de l'eau qui sort de la roche. Des exemples spectaculaires sont bien connus, ainsi l'Eisriesenwelt ou plus près de nous, le trou du Glaz dont le nom vient de la présence de glace résiduelle en été au porche d'entrée. La douche qui tombe du plafond à 20 m de l'entrée est saisie et transformée en glace par le fort courant d'air glacé aspiré par l'orifice du Glaz.

Au Trou qui Souffle de Méaudre, la quantité de glace qui se forme est très variable d'une année à l'autre. On trouve de la glace jusqu'à 200 m de l'entrée. En général, au mois de février, le spéléo doit casser la glace mais le courant d'air passe facilement. En 1985, la quantité de glace formée a été tellement importante que le trou s'est bouché complètement à l'entrée (cf. § 1.1.3). Il n'y avait plus le moindre courant d'air et il a fallu dynamiter la glace pour ouvrir un passage. Ce qui est curieux dans ce cas c'est que la glace supprime la cause qui l'a créée et isole la suite du gouffre. Ce phénomène de bouchon de glace peut induire des relaxations intéressantes comme nous le verrons plus loin (§ 1-6-6).

Cette formation de glace se produit principalement après une perturbation océanique. Le vent souffle du sud, il est chaud. Il pleut en montagne et l'eau s'infiltre dans le sol (crue). Le vent tourne ensuite à l'ouest puis au nord. La température s'abaisse, la neige succède à la pluie. L'eau qui s'est infiltrée dans le sol ruisselle sur les parois avec un retard de 1 ou 2 jours. Mais l'air froid le gèle aussitôt. Une grande quantité de glace peut ainsi se former en une journée seulement. Ainsi, c'est le déphasage temporel entre l'écoulement de l'eau dans la cavité et la pluie génératrice qui permet ce englacement.

Le reste du temps, le ruissellement est beaucoup plus petit. Mais de la glace peut cependant se former pendant les hautes pressions, classiques au mois de février et associées à du beau temps ensoleillé froid. La journée, le soleil peut faire fondre localement la neige sur les parois rocheuses bien exposées. La nuit, le froid gèle toute cette eau. Cette glace est en général localisée au porche d'entrée.

1.6.2. Facettage de parois de glace par le courant d'air

L'eau peut façonner les parois du calcaire en taillant des creux en forme de cuillère à soupe, appelés coups de gouges (ou vagues d'érosion). De la même façon, le courant d'air peut fondre, d'une manière différentielle, la neige ou la glace pour dessiner des coups de gouges souvent de taille géante. Dans les gouffres de montagne, la neige s'accumule durant l'hiver et fond à la belle saison. Le spéléo qui descend alors ces gouffres passe en général entre une paroi de roche et une paroi de névé, et ce névé est toujours facetté de coups de gouges. Dans les grottes glacées en permanence, il y a toujours des périodes de fonte partielle, les parois de glace sont tapissés de coups de gouges (Eisriesenwelt). On remarque que la présence de cette glace étant elle même due au courant d'air, c'est le même agent qui fait et qui défait ...

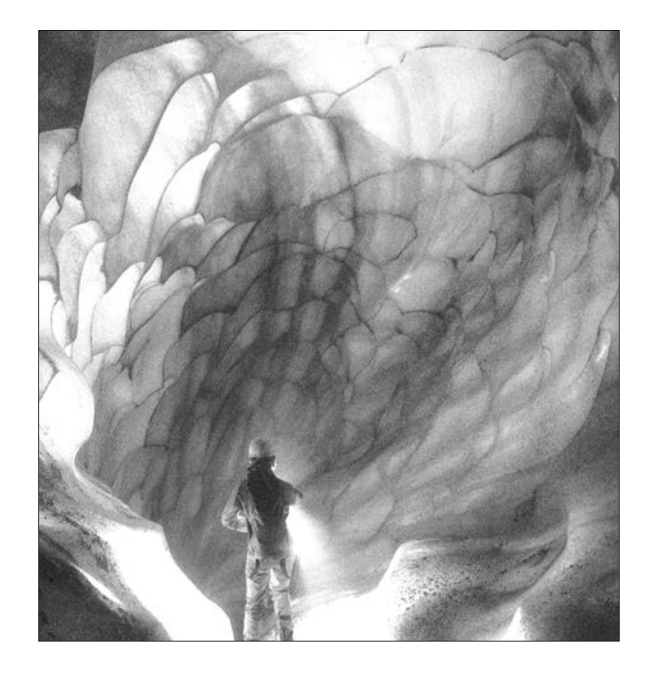


Fig. 1-26- Coups de gouges dans la glace en Islande
(magnifique photo de Rémy Wenger,
dans Voyage au centre de la terre, 1986
avec l'aimable autorisation des éditions Double Page)

Splendid ice scallops in a glacier in Iceland

1.6.3. Creusement par le courant d’air de grottes et de gouffres dans la glace

Tous ceux qui fréquentent la montagne ont observé pendant l’été des ruisselets de fonte des neiges coulant sous un névé. Dès que l’eau a ouvert le passage, un courant d’air s’instaure entre le point haut et le point bas du névé (courant d’air descendant). Il se forme une grotte sous-névière et cette grotte croît en taille grâce, en partie, au courant d’air.

À Isèye, dans les Pyrénées où je suis allé pendant 15 ans, ce phénomène est très banal et les journées de repos étaient souvent consacrées à l’exploration de ces mini-traversées souterraines. Comme on peut s’y attendre, le porche de l’entrée supérieure est plus grand que le porche de sortie.

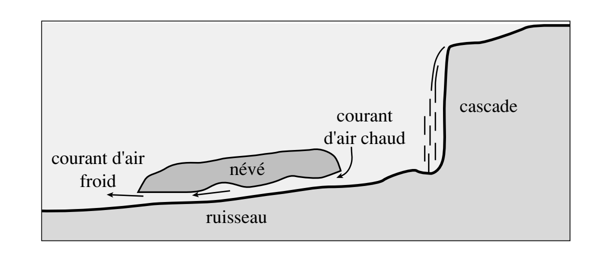


Fig. 1-27- Grotte sous-glaciaires

Ice cave under glacier is analogous with limestone cave

1.6.5. La glacière d’Autrans, un bon exemple de courant d’air unidirectionnel

Une cavité en forme de tube, dont les deux entrées sont à la même altitude et ont la même exposition, ne devrait être parcourue par aucun courant d’air. Nous allons examiner si cette situation est stable ou instable. Elle sera instable si une perturbation modifie la cavité d’un point de vue thermique, dans un sens tel que le phénomène perturbateur s’amplifie, et stable dans le cas contraire (Lismonde, 2001).

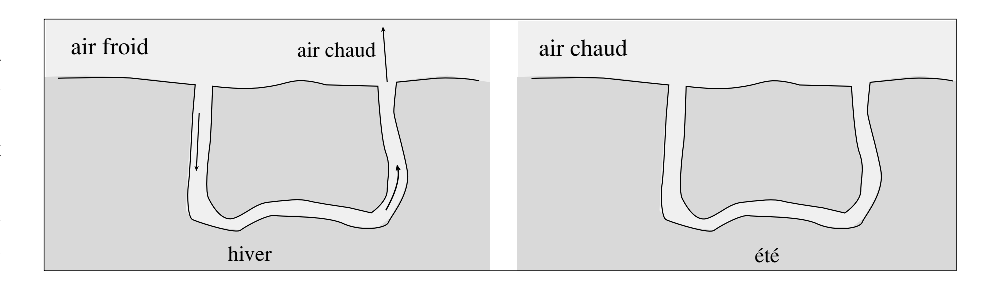


Fig. 1-28- Courant d’air dans un tube en U, analogue à un piège à air froid

Air flow in the U pattern cave. It is analogous with cold air trap

Le système fonctionne comme un piège à air froid. L’hiver, l’air est renouvelé par un courant d’air qui pénètre par une branche et ressort par l’autre. Il peut sembler étrange que le courant d’air choisisse une branche plutôt qu’une autre pour entrer dans le réseau, mais les systèmes naturels présentent toujours une certaine dissymétrie qui se traduira par la dissymétrie de fonctionnement. Même si les deux branches étaient identiques, il y aurait tout de même «brisure de symétrie» en fonctionnement hivernal. En été, en revanche, aucun courant d’air ne viendra parcourir le réseau, comme pour un piège à air froid.

Imaginons un fonctionnement de cavité en forme de U un peu différent, comme à la glacière d’Autrans en Vercors. Une des deux entrées est plus ouverte que l’autre et de la neige peut s’accumuler pendant l’hiver, source de froid en été.

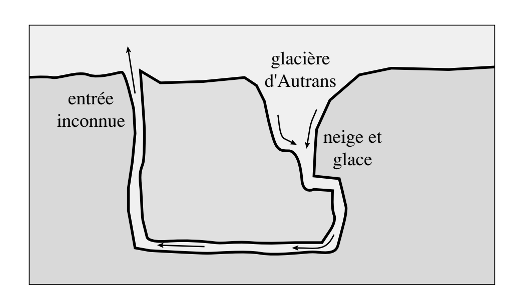


Fig. 1-29- Le courant d’air de la glacière d’Autrans est presque toujours aspirant

Air flow in the ice cave of Autrans. The ice generates an air flow with constant direction

Pendant l'été, le courant d'air descend par la branche froide et fond une partie de la glace en se refroidissant fortement (température voisine de zéro degré). Dans la branche remontante, le courant d'air se réchauffe de nouveau, en se rapprochant de la température moyenne annuelle du lieu (de l'ordre de 5°C) et la température y est plus élevée que dans la branche de droite. Pendant l'hiver, la neige s'accumule de nouveau, l'air est toujours plus froid et le courant d'air garde toujours le même sens. On se retrouve avec une cavité froide du genre glacière. Le courant d'air est toujours dans le même sens. Les sources chaudes et froides du moteur thermique ne renversent pas leur rôle. Pour la branche de droite, la source froide est la glace, c'est à dire la température hivernale de l'atmosphère. Pour la branche de gauche la source chaude est la température annuelle de l'eau qui descend à travers la roche, c'est à dire un peu moins que la température de l'atmosphère.

On voit que la dissymétrie géométrique des deux entrées induit une dissymétrie permanente climatique dans la glacière dont la température moyenne est nettement plus basse que la température moyenne du secteur. On peut penser que le courant d'air sera plus fort en hiver qu'en été. Bien sûr, il ne peut pas être très violent, mais le débit peut être assez important. Une autre particularité est qu'en été, la vitesse du courant d'air n'est pas simplement liée à la température extérieure.

1.6.6. Un phénomène remarquable de relaxation lié au courant d'air

Puisque le courant d'air varie avec une période annuelle, on s'attend à ce que ses conséquences suivent à peu près cette périodicité. C'est le cas pour la formation de la glace. Nous allons décrire un exemple où les conséquences ont une fréquence beaucoup plus faible (en physique on parlerait de sous-harmoniques).

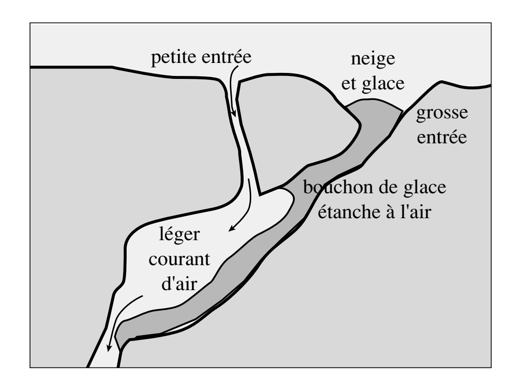


Fig. 1-30- Phénomène de relaxation décennal à la Victoire de Samothrace (Parmelan, Haute-Savoie)

About decennial relaxation phenomenon in the Samothrace pit (ice melting by air flow)

Au gouffre de la Victoire de Samothrace au Parmelan, il y a deux entrées. L'une est énorme et avale très facilement la neige pendant l'hiver. L'autre est petite et à l'abri de la neige. Le phénomène de relaxation (variation périodique) est le suivant : quand le grand trou est ouvert, il se bouche complètement pendant l'hiver qui suit et une grande quantité de neige est avalée grâce à la forme en entonnoir de l'entrée. Pendant l'été suivant, il reste bouché. Pendant le deuxième hiver, la neige s'entasse de nouveau et alimente un peu la couche superficielle.

Mais l'entrée secondaire continue à fonctionner. Le courant d'air est aspirant l'été et ce courant d'air attaque le tas de neige par le bas rendant le gouffre très dangereux car des écroulements se produisent dans la masse de neige et de glace. Cette attaque déplace, au cours des ans, la voûte de neige vers le haut. Un beau jour, le culot de neige, miné par en dessous, s'effondre et l'entrée principale est de nouveau ouverte jusqu'à l'hiver suivant. D'après les observations de Guy Masson, la période de ce phénomène aurait été de 7 à 8 ans pour les décennies 80-90.

1.6.7. Grottes sous-glaciaires en Islande

Les grottes dans les glaciers Islandais, avec leur sous-sol volcanique, peuvent être parcourues par un fort courant d'air car les deux sources de chaleur nécessaires pour faire fonctionner le moteur à courant d'air sont puissantes et de températures très différentes (glace et eau bouillante). On peut dire que certaines parties de ces grottes sont directement creusées par le courant d'air. Il est probable que celui-ci fonctionne souvent en régime hivernal (du point bas vers le point haut).

De grands réseaux de plus de 500 m de dénivellation y ont été explorés (Kverkjöll dans le glacier Vatnajökull). Gérald Favre (1985) décrit la «Rivière Chaude» alimentée par des solfatares (eau bouillante et dioxyde de carbone) et percée d'un gouffre comme sur la figure ci-après.

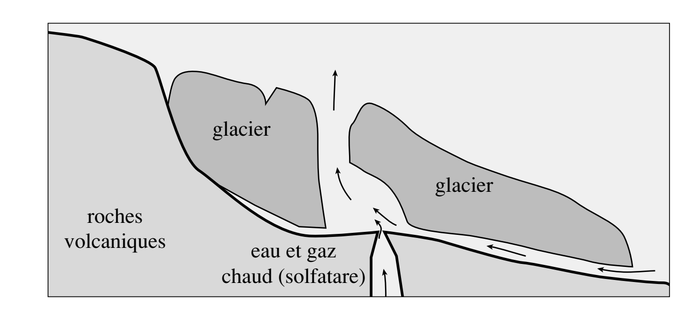


Fig. 1-31- Grotte glaciaire volcanique en Islande

Volcanic glacier cave in Iceland (the warm air melts the ice)

Il indique aussi dans la galerie amont un siphon de gaz carbonique parfaitement irrespirable (bouteille de plongée nécessaire). Toutes les galeries creusées dans la glace sont tapissées de coups de gouges (cupules). La photo de Remy Wenger a été prise dans ces grottes (§ 1.6.2).

1.7. Condensation et évaporation

1.7.1. Eau de condensation sur les parois de grottes. Le P 40 à la Dent de Crolles

La traversée P 40 - Glaz est une course classique de la Chartreuse. Pendant l'été, le gouffre aspire l'air chaud extérieur qui s'engouffre dans le puits du Cabri très exigu. Un peu plus loin, on rampe dans des laminoirs qui amènent encore du courant d'air.

Le 18 août 1993, avec une température extérieure de 18°C, on pouvait mesurer 0,7 m^3/s de courant d'air à la sortie des laminoirs. Cet air déposait constamment une forte humidité sur les parois et un filet d'eau minuscule était même visible au sol. La présence d'un peu d'argile rendait la progression particulièrement «visqueuse». Ceux qui connaissent cette traversée savent que l'air est alors pénible à respirer, tellement il est moite.

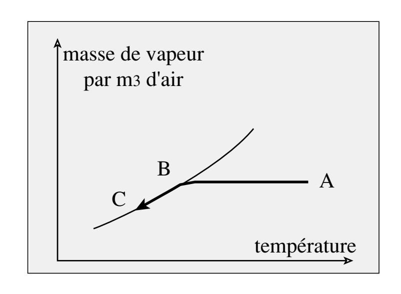


Fig. 1-32- Condensation par refroidissement de l'air (dans le diagramme de l'air humide)

Condensation by air cooling (in a moist air diagram)

Pour expliquer ces phénomènes, le plus simple est de considérer le diagramme de l'air humide. En abscisse, est reportée la température de l'air et en ordonnée, la masse de vapeur d'eau. La particularité de l'air est de ne pouvoir contenir qu'une quantité limitée de vapeur d'eau. La courbe limite est appelée courbe de rosée ou courbe de saturation.

L'air chaud (point A) qui entre dans la cavité n'est pas saturé en humidité, mais il se refroidit au contact des parois. Le point représentatif de l'air rejoint la courbe de rosée en B. De l'eau se dépose sur les parois (correspondant à la différence de masse entre les points B et C). L'air est alors à 100% d'humidité, d'où cette impression de moiteur.

1.7.2. Un brouillard à noyer les poumons dans la sima Segalette (Cantabria)

Cela se passait à 600 m d'altitude à côté de Ramales le 20 août 1994. Il faisait très chaud, environ 35°C et très humide à l'extérieur. Nous venions de trouver un nouveau trou dans le grès qui recouvre à cet endroit les couches de calcaire, et je le descendais. Un très fort courant d'air aspirant indiquait un gouffre prometteur, 1 à 2 m^3/s peut-être. J'avais planté un spit et je descendais tranquillement au descendeur quand, vers 40 mètres de profondeur, j'entrais dans un brouillard épais. Le nuage ne faisait qu'une dizaine de mètres de hauteur et bientôt j'en sortis avec cette impression de moiteur étouffante de l'air saturé. Les parois dégoulinaient d'humidité.

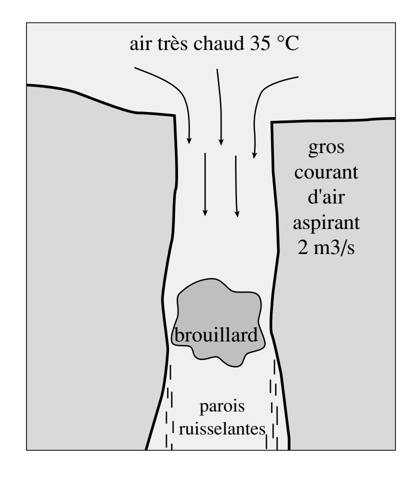


Fig. 1-33- Courant d'air aspirant à la Sima Segalette.
Un nuage de brume stationne dans le puits à -20 m

An incoming air flow in sima Segalette. creates a fog in the pitch

La sensation de se noyer provenait sans doute d'un retard à la condensation. L'air était localement sursaturé et la vapeur excédentaire profitait du passage dans les poumons pour condenser.

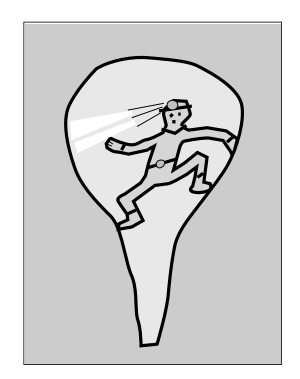
Birebent (1948, p 73) rapporte une impression semblable à l'entrée de l'Anou Boussouil.

1.7.3. Au Trou qui Souffle, facilité de parcours du méandre François en fonction des saisons

Le courant d'air peut avoir une incidence très grande sur la facilité de parcours d'une cavité. Bien sûr, les dépôts de glace aux entrées aspirantes en fournissent un exemple évident, mais la condensation en offre une application plus subtile.

Fig. 1-34- Humidification et séchage d'un méandre par le courant d'air au Trou qui Souffle
Méandre sec = parcours facile, méandre humide = parcours difficile

Moistening or drying of François meander by air flow in Trou qui Souffle.
The cavers progression in summer and winter are very different



Au Trou qui Souffle de Méaudre, les habitués de ce gouffre savent que le méandre François situé à 800 m de l'entrée et à la cote de -160 m, est d'un parcours très facile en plein hiver. Les parois en sont bien sèches, l'adhérence y est satisfaisante pour faire des oppositions même délicates. En revanche, à la fin de l'été, la situation est très différente. Tout glisse affreusement. Les oppositions au-dessus du surcreusement s'avèrent redoutables. La vitesse de progression est divisée par deux. Les débutants sont particulièrement sensibles à ce changement.

L'hiver, le trou aspire de l'air froid extérieur. En se réchauffant, il se dessèche et dessèche les parois. Ce phénomène à la fin de l'hiver concerne un kilomètre de galeries jusqu'à la salle de la Conciergerie. Le méandre devient sec et agréable. L'été en revanche, l'air provient du fond de la cavité. Cet air est chargé en humidité et rencontre des parois refroidies par l'air hivernal. Il se refroidit par conséquent, et de l'eau se condense sur les parois du méandre François dont la fine pellicule d'argile se transforme en «savonnette». Plus près de l'entrée, la galerie s'appelle galerie des Condensations ...

1.7.4. Brouillard à la rencontre de deux courants d'air. Salle Guillaume à la cueva Cañuela

La grotte de la Cañuela est décidément un laboratoire exemplaire pour les circulations aérauliques. Le courant d'air y est «bestial» et une longue fréquentation m'a permis de la voir dans tous ces états. Nous descendions à deux, le 12 avril 1988, Bernard Lips et moi pour finir d'équiper la traversée Tonio-Cañuela avec des amarrages en sommet de puits et des mains courantes aux endroits délicats.

Une tempête les jours précédents avait provoqué une énorme crue dans les différents réseaux du coin. En particulier, dans la traversée Cueto-Coventosa, un secours avait lieu pour débloquer une équipe espagnole immobilisée par la montée des eaux de la Coventosa. Vues les douches qui tombaient dans les puits, nous n'étions restés que deux pour finir cet équipement. Le travail se fit sans encombre, mais quand nous eûmes atterri au milieu de l'immense salle Guillaume, de 300 m de long et 80 m de large, une surprise de taille nous attendait, un brouillard épais nous empêchait de voir à plus de 5 à 10 m. Je connaissais bien cette salle et je m'imaginais trouver facilement la sortie en bas de la pente d'éboulis. Nous nous étions séparés de quelques mètres pour mieux trouver cette sortie. Mais, malgré cette précaution, il nous fallut une heure de recherche pour trouver le passage dans les blocs. Si on m'avait dit que je me perdrais dans une grotte à cause du brouillard...!

Le phénomène est facile à expliquer après coup. L'air tiède descendant du plateau et arrivant à la salle Guillaume était chargé d'humidité à cause du mauvais temps. Cette masse se heurtait au courant d'air froid de la galerie Tantale (cf. § 1.5.2).

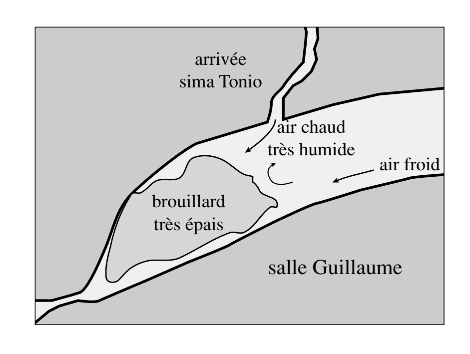


Fig. 1-35- Brouillard à la salle Guillaume à la cueva Cañuela

Mist in the Guillaume chamber in Cañuela cave, by the mixing of two air flows

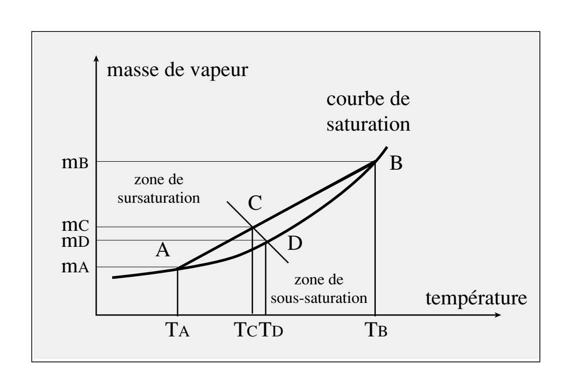


Fig. 1-36- Formation de brouillard par mélange d'air (dans le diagramme de l'air humide)

Mist formation by air mixing (in a moist air diagram)

Le mélange de deux masses (A et B) d'air saturées d'humidité et de température bien différentes libère une énorme quantité de gouttes d'eau de condensation, à l'origine du brouillard (correspondant à la quantité CD). Le phénomène s'explique par la courbure de la courbe de saturation de la vapeur d'eau dans l'air. Si la courbe était une droite, il n'y aurait pas de brouillard par mélange. Ce phénomène est analogue à la célèbre reprise de corrosion par mélange des eaux (Bögli), qui provient de la courbure de la courbe de saturation du calcium dans l'eau en fonction de la température.

On peut observer des brouillards dans la plupart des grandes cavités après une forte crue, et souvent dans les salles quand elles sont au carrefour de galeries différentes, donc de courants d'air différents. De bons exemples, parmi d'autres, sont la salle d'Hydrokarst au Trou qui Souffle de Méaudre et la salle du Chaos à la Diau en Haute Savoie.

1.7.5. Observation d'un brouillard à l'extérieur. Les trous qui fument

Les trous qui fument ont toujours frappé les imaginations. Voir de la fumée (brouillard) sortir d'un gouffre réputé être en communication avec les Mondes Infernaux, quelle magnifique preuve de la légende !

En tout cas, les noms témoignent : Trou qui Fume de Furfooz dans les Ardennes Belges, grotte de la Fumée en Chartreuse, Gour Fumant à Herbouilly.... Pour ce dernier trou, nous possédons la belle description de Bourgin. J'ai pu observer de tels brouillards au Trou qui Souffle de Méaudre.

C'était par une matinée tiède d'automne. Il avait beaucoup plu la veille et le sol était gorgé d'eau. L'air extérieur était donc saturé d'humidité et des bancs de brumes s'étiraient dans le val d'Autrans-Méaudre. Le courant d'air sortant du trou s'écoulait en serpentant sur la route goudronnée, il était magnifiquement souligné par des traînées de brumes qui apparaissaient à la périphérie du courant d'air, dans la zone où l'air tiède se mélangeait à l'air glacé du trou. Cette brume était fugace, car elle s'évaporait très vite, un peu plus loin.

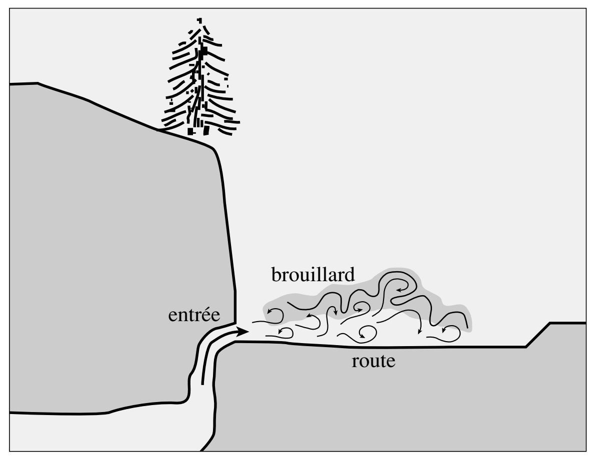


Fig. 1-37- Brouillard par mélange au Trou qui Souffle (l'air froid de la grotte et l'air chaud et humide de l'extérieur)

Mist formation by air mixing in the Trou Qui Souffle (cave cold flow and warm moist external air)

Ces phénomènes, comme l'a expliqués André Bourgin, n'apparaissent que dans un air extérieur très humide après une pluie. L'air de la grotte est lui aussi saturé d'humidité après la crue. Le mélange donne un brouillard comme dans les cavités. Mais l'atmosphère extérieure est grande et ce brouillard est souvent vite éliminé.

Un autre exemple était observable le 28 août 1994 au trou du Glaz. Il avait fait beau pendant la journée et le soir venu, le trou du Glaz dégueulait un courant d'air de 3 ou 4 m^3/s environ. Une fois sortis du trou vers 21 h 30, nous nous changions près de l'entrée, à la lumière de nos acétylènes et dans l'air tiède de la nuit. Tout à coup, il y eut un petit coup de vent et nous nous retrouvâmes dans un brouillard. Je crus un instant qu'un nuage nous avait rejoint, mais dès que le coup de vent cessa, le brouillard disparut. À chaque coup de vent, le courant d'air sortant du trou était brassé violemment et un brouillard se formait aussitôt.

1.7.6. Les porches d'entrée avaleurs de brouillard. Le Guiers Mort

La Dent de Crolles domine fièrement de loin la ville de Grenoble. Le point bas du réseau est la grotte du Guiers Mort. Au porche d'entrée, le 13 décembre 1992, alors que la température était légèrement négative à l'extérieur, la grotte aspirait goulûment l'air extérieur (3 ou 4 m^3/s). Ce courant d'air transportait avec lui le brouillard (nuage) qui régnait à l'extérieur. On pouvait constater que le brouillard s'atténuait rapidement et disparaissait à moins de cent mètres de l'entrée.

Les parois de la grotte réchauffent le courant d'air hivernal et le taux d'humidité de l'air diminuant, les gouttes de brouillard peuvent s'évaporer facilement.

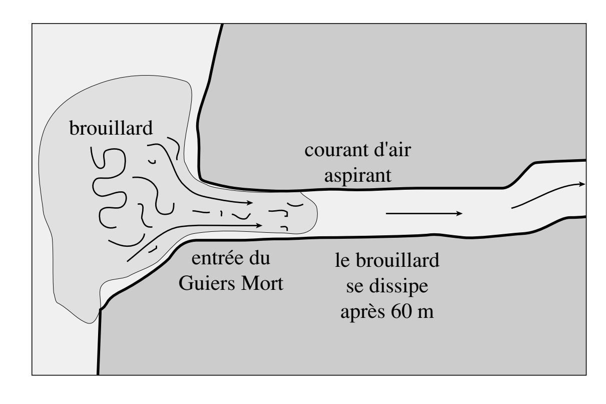


Fig. 1-38- Le brouillard pénètre dans le Guiers Mort et s'évapore en une centaine de mètres

Mist coming into the Guiers Mort cave. It evaporates after 100 m.

1.7.7. Observation d'un brouillard à la cueva Cullalvera et dans la Cañuela

Le 19 août 1994, j'étais allé faire des mesures de températures à l'entrée de la Cullalvera (Ramales, Espagne) avec Frédéric Aitken. Nous observions le mélange d'air chaud et d'air froid qui se produit à 200 mètres de l'entrée. La descente de l'air froid du petit barrage naturel et l'écoulement de l'air froid au sol étaient magnifiquement soulignés par un fin liseré de brume à l'interface entre l'air froid et l'air plus chaud au-dessus. Pour le voir commodément, il fallait se baisser et se mettre au niveau de cette interface.

Une observation très voisine a été faite à la cueva Cañuela (7 mai 1993). Alors que le porche soufflait environ 15 m³/s, on pouvait observer un brouillard dans la galerie d'entrée sur une cinquantaine de mètres environ. Ce brouillard était situé à quelques mètres de hauteur comme nous avons pu le vérifier à l'aide d'un phare de 50 W.

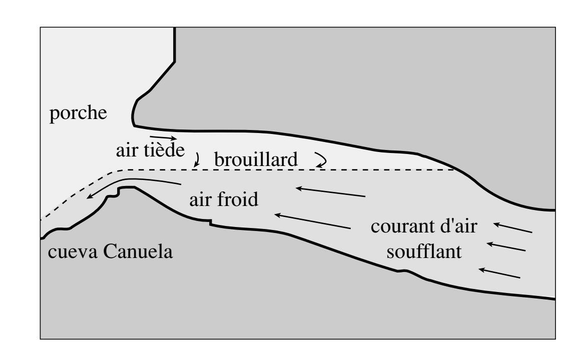


Fig. 1-39- Brouillard à la surface d'un lac d'air froid à l'entrée de la Cañuela

Mist at the surface of «cool air lake» in Canuela entrance, by stratification effect.

Le courant d'air froid (12°C environ) remplissait le bas de la galerie comme pour une résurgence siphonnante. Ce courant d'air se déversait ensuite dans la pente. Mais dans le porche qui fait 12 m de hauteur, le courant d'air extérieur chaud (20°C environ) pénétrait par le haut et se refroidissait en se mélangeant avec l'air froid. Il apparaissait un brouillard car cet air chaud atteignait la saturation.

Le brouillard augmente la beauté du contre jour que l'on peut observer en sortant de la grotte (photo dans spelunca n° 82, 2001, p. 11). Comme le brouillard se dépose en partie sur le sol, ce dernier est glissant, alors qu'à cent mètres à l'intérieur, il est sec. On peut observer le même phénomène d'entrées grasses et glissantes à la cueva Coventosa sur une cinquantaine de mètres et à la cueva del Agua sur une trentaine de mètres de l'éboulis d'entrée.

1.8. Entraînement d'air par l'eau

1.8.1. Courant d'air entraîné par l'eau des cascades à la grotte de Gournier

La rivière de Gournier sort du siphon Jérôme, dévale en cascades sur 100 m de dénivellation, puis coule dans un canyon de belle hauteur avec quelques chutes d'eau. À l'étiage, le parcours en est assez facile car le débit descend à 30 l/s. En revanche, en crue, le débit peut monter à plusieurs m³/s et la galerie devient impraticable. Les cascades, en particulier, brassent l'air violemment. Des embruns sont projetés de tous côtés et tremperaient le spéléo imprudent (nous en avons eu la démonstration lors du sauvetage de 1976).

Ce canyon est surmonté d'une galerie fossile de vastes dimensions qui se prolonge par une galerie plus petite, la galerie de l'Aragonite. L'extrémité en est obturée par une coulée stalagmitique, mais sur le côté, une fissure minuscule et impénétrable assure une communication avec la salle Chevalier, comme le montrent la topographie et le bruit des cascades. À l'étiage, il n'y a guère qu'un petit souffle d'air. Mais lors des grandes crues, on entend le mugissement des cascades de la salle Chevalier, et un violent courant d'air est aspiré dans la fissure. Plusieurs visites à différents débits en 1991 et 1992, nous ont montré la corrélation entre le débit du courant d'air et le débit d'eau au-dessous, et cela indépendamment de la saison.

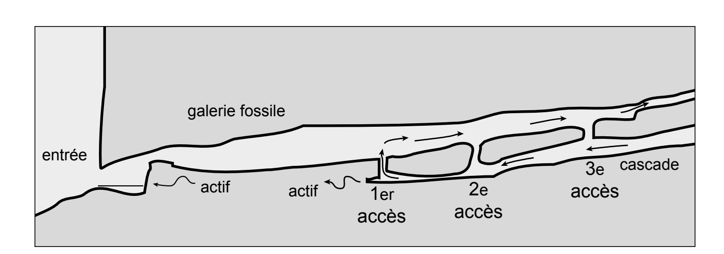


Fig. 1-40- Les circulations d'air en boucles, engendrées par les cascades à la grotte de Gournier

Air flow loops driven by waterfalls in Gournier cave

L'eau entraîne l'air vers l'aval dans les réseaux actifs. Cet air doit revenir vers l'amont et il le fait de préférence par la galerie fossile qui offre une moins grande résistance. Pour la fissure du réseau de l'Aragonite, le débit n'est pas très grand, mais toute la perte de charge de la salle Chevalier et du canyon se retrouve au niveau de la chatière de l'extrémité de l'Aragonite, d'où le violent courant d'air qui ronfle, mais dont le débit ne dépasse guère 100 l/s.

Depuis l'ouverture du siphon de +267 m, un courant d'air de type tube à vent s'est installé à Gournier mais le fonctionnement du courant d'air de l'Aragonite n'est pas modifié : faible à l'étiage dans le sens du courant d'air général, fort en crue. L'hiver, l'effet de la crue s'ajoute au tube à vent, l'été, il se retranche. C'est l'inverse dans l'actif où les effets s'ajoutent l'été.

1.8.2. Entraînement de l'air par les cascades au trou de l'Aygue

Le trou de l'Aygue dans le sud du Vercors, possède trois entrées connues. Une traversée est possible en entrant par l'entrée intermédiaire 160 m au-dessus de l'entrée inférieure, sortie de l'eau. Le 27 mai 1995, la traversée était impossible car un débit d'eau de plus de 100 l/s parcourait le laminoir de 90 mètres de long qui constitue la sortie du réseau. Le courant d'air pouvait néanmoins passer. Nous nous sommes contenter d'équiper les puits et d'aller voir les cascades. Le spectacle en était magnifique. Un débit de 80 l/s s'écrasait avec un bruit d'apocalypse et une giclée d'embruns.

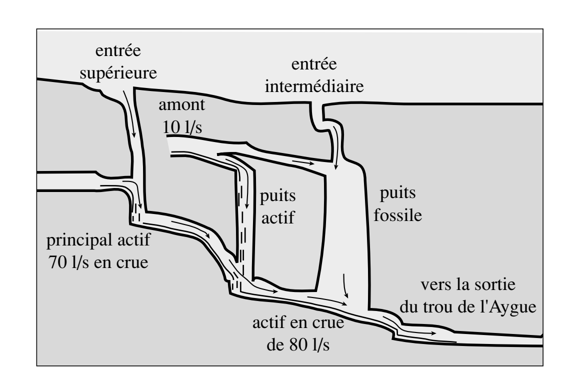


Fig. 1-41- Circulation d'air au trou de l'Aygue (Drôme) par effet cheminée et cascades

Air flow in trou de l'Aygue by chimney effect and waterfalls

L'eau dans l'entrée intermédiaire provient d'un amont constitué de galeries qu'on peut suivre sur quelques centaines de mètres. Le débit était assez petit, 10 l/s, mais le débit d'air était, ce jour-là, de 2,2 m^3/s. Cet actif se jette dans les puits par une petite galerie. Presque tout l'air suivait l'eau, comme happé par l'entraînement dû aux cascades. La communication vers le puits fossile, pourtant de forte taille, n'était parcouru que par un débit de 0,2 m^3/s. Il est vrai que l'entrée intermédiaire avalait 1 m^3/s ce qui permettait à l'énorme puits fossile de transporter tout de même un débit d'air de 1,2 m^3/s.

On voit donc que l'effet d'entraînement de l'eau était de permettre un débit d'air de 3 m^3/s par les puits actifs, alors que l'énorme puits fossile n'en transportait que 1,2 m^3/s.

1.8.3. Tempête dans un gouffre, la Fromagère en crue

Les courants d'air dans les trous peuvent être forts et désagréables, mais ils ne le sont jamais autant que lorsque une crue s'en mêle. L'eau entraîne des quantités énormes d'air. Une expérience dramatique que j'ai vécue au gouffre de la Fromagère montre l'inhumanité que peut prendre un gouffre en crue. Une pluie sur la neige alors que nous bivouaquions à quatre dans le gouffre de la Fromagère le 10 décembre 1979 provoqua une forte crue pendant que nous remontions. Nous arrivâmes déjà bien trempés au bas du puits de 200 m arrosé à -380 m. Il y régnait un bruit d'enfer. La cascade tombait en gros paquets d'eau accompagnés par un vent de tempête chargé d'embruns. Le débit dépassait 10 l/s et la corde à plusieurs reprises passait à proximité immédiate de la cataracte. 200 m de remontée aux bloqueurs ne réussirent pas à nous réchauffer. Cette expérience pourtant ancienne est restée gravée dans ma mémoire, mais c'est l'eau qui était le facteur d'épouvante, pas l'air. Plus haut et ce même jour, deux de mes amis (Jacques Vey et Daniel Lepage) sont morts sous cascade au cours de la remontée d'un petit puits. Jour noir …

1.8.4. La crue chasse l'air à la Luire

La Luire dans le Vercors est célèbre pour ses crevaisons. À ces occasions, le porche se met à couler et un débit d'eau jusqu'à 60 m^3/s peut en sortir. La mise en charge est de 450 mètres. La plus grande partie des galeries est alors noyée. Jean-Jacques Garnier rapporte une observation intéressante le 14 février 1990 (Garnier, 1991). Son fils Laurent qui soupçonnait une crevaison possible est monté voir le porche à 10 heures. Un courant d'air violent sortait alors des puits. À 16 heures, il descendit voir et trouva l'eau à - 80 qui montait dans les puits. Elle est sortie du porche vers minuit et le débit s'est maintenu un jour. La montée de l'eau s'est faite en 36 heures environ.

Le volume qui s'ennoie à la Luire étant estimé à 360 000 mètres cubes, cela représente un débit moyen de 300 l/s de courant d'air. À certains moments, il a dû dépasser le m^3/s. C'est donc bien un violent courant d'air que peut créer la crue. Il serait intéressant de mesurer en continu le courant d'air car cela fournirait le volume d'eau emmagasiné dans la Luire.

1.8.5. Un phénomène historique célèbre, le Trou Souffleur de Saint Christol

Cela se passait le 26 décembre 1935 (Guigues et Girard, 1949, p. 84, Gaubert et Le Fahler 1990, p. 133). Il avait plu sur le plateau d'Albion dans le Vaucluse alors qu'il y avait de la neige. La crue était phénoménale. Les habitants de Saint Christol furent réveillés en pleine nuit par un sifflement sans doute pas aussi fort que celui d'une locomotive mais impressionnant en ces lieux paisibles. Une fissure du calcaire laissait sortir un violent courant d'air qui était à l'origine du sifflement. Un béret posé sur l'orifice était aussitôt éjecté. Le phénomène dura quelques heures, puis s'arrêta. Des travaux furent entrepris pour agrandir la fissure et finalement un puits fut vidé de son remplissage. Mais le réseau convoité ne fut pas atteint.

Plus récemment, en 1987, le GSBM réussit à passer et mit à jour un grand gouffre qui constitue un regard sur un affluent important de la Fontaine de Vaucluse (la rivière d'Albion à - 600 m). Ce gouffre est certes parcouru par un courant d'air, mais il est très modeste. Pendant l'été, c'est seulement 100 l/s qui sortent du gouffre. Et ce courant d'air ne peut pas expliquer le sifflement mémorable.

La seule explication qu'on peut trouver à ce phénomène (si le sifflement était bien celui décrit) est la montée brutale du niveau piézométrique de l'eau à -600. On sait que le puits Gendre peut voir l'eau monter pendant les grandes crues de plus de 50 m. Les vides situés à cette profondeur ont été envahis par l'eau et la pression de l'air a augmenté proportionnellement au rapport : volume d'air initial/ volume d'air résiduel. L'air a emprunté la moindre fissure et celle de Saint Christol s'est mise à cracher à grande vitesse.

Dans les régions de plateau où les niveaux des nappes phréatiques fluctuent beaucoup, on trouve des phénomènes analogues de courants d'air soufflant pendant la montée des eaux (et sans doute aspirant faiblement pendant la descente), mais il ne faut pas confondre ce mécanisme avec celui de la respiration des cavernes due aux fluctuations de la pression atmosphérique.

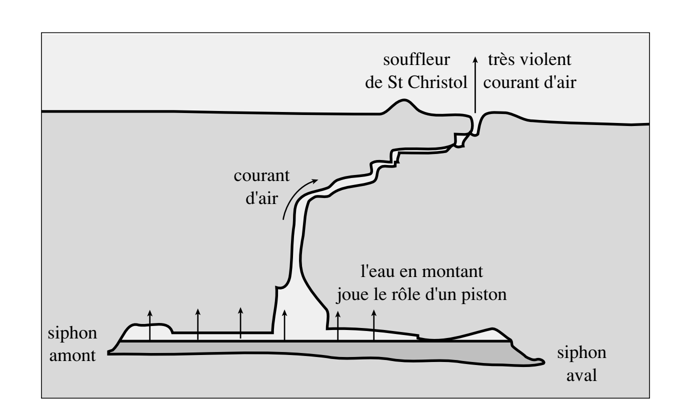


Fig. 1-42- Une locomotive à vapeur à Saint Christol d'Albion (Vaucluse) ?

A reciprocating engine effect at St Chistol, a violent flow and noise

---

1.9. Effets mécaniques d'un courant d'air

1.9.1. La mise en oscillation de grandes concrétions à la cueva Cañuela

À la cueva Cañuela, le courant d'air est important et dans la galerie des Sabres, de grandes concrétions stalactitiques en forme de sabres effilés pendent du plafond sur 5 ou 6 m. Dans le sens transversal, la minceur des concrétions fait qu'elles sont très souples (elles ne peuvent pas résister à des efforts de flexion). Les jours de grandes chaleurs, quand le courant d'air est maximal, on peut voir ce phénomène surprenant de gigantesques concrétions qui oscillent lentement sous l'excitation des turbulences du vent (la période, si mes souvenirs sont exacts, est de l'ordre du Hertz). Ce phénomène ne se rencontre que peu fréquemment.

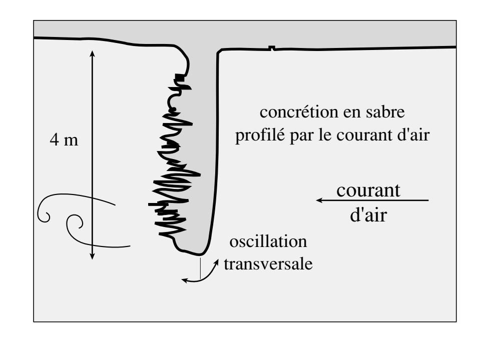


Fig. 1-43- Oscillation des sabres à la Cañuela

Stalactite oscillation in the air stream of Cañuela cave

1.9.2. Le Monstre de la salle Blanche au Juhué

C'était à la sima del Cueto (gouffre Juhué) juste après Noël 1979. J'étais avec François Charpentier et nous étions dans la future galerie de jonction avec la Coventosa. Nous venions de découvrir la Salle Blanche et étions encore un peu émus de la beauté du site avec ses somptueuses décorations de gypse. François était devant moi. Tout à coup, il fit un saut en arrière et me montra quelque chose du doigt. Sur le sol de la galerie, une chose d'une trentaine de centimètres de haut se balançait lentement. Nous crûmes un instant à une bête. Ce n'était pas cela ; c'était une espèce de champignon de cristaux enchevêtrés (de la lublinite ?), une substance quasiment impalpable, de la légèreté de la «barbe à papa» qui s'agitait dans le vent. Nous prîmes bien garde de ne pas la toucher. Mais cet objet presque vivant, qui avait commis la faute d'être en plein sur le passage, fut écrasé par la suite par quelque visiteur inattentif.

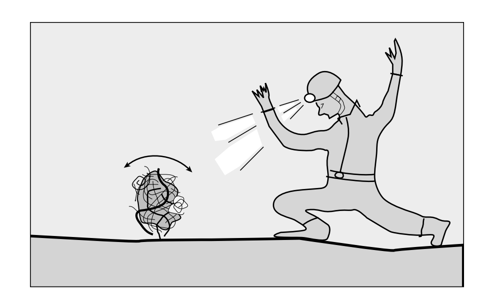


Fig. 1-44- Le «monstre» de la salle Blanche au Juhué, une touffe de cristallisation, légère comme de la barbe à papa, oscillant dans le vent

The «monster» of White room in Juhué, a clump of crystallizations, oscillating in the air stream

1.9.3. Les insectes de la Sima Tonio

La Sima Tonio à Socueva possède une entrée minuscule qui donne sur un puits de 15 m en cheminée étroite. L'été, il s'y engouffre un violent courant d'air de près de 1 m^3/s. Pour le spéléo, le passage est assez désagréable car il prend en pleine figure les grains de poussières décrochés des parois par le passage à frottement dur. Mais pour les insectes, la situation est beaucoup plus dramatique. Les mouches, les guêpes et autres insectes volants qui s'aventurent trop près de la

bouche du gouffre sont aspirés et se retrouvent 15 m plus bas, là où le courant d'air est plus calme. Mais leur vitesse ascensionnelle est trop faible pour lutter contre les 50 km/h du courant d'air et ils restent prisonniers en bas du puits, à la grande joie des araignées. Certains d'entre eux entreprennent de remonter la paroi à pied ! D'autres plus malins, profitent de la remontée des spéléos quand il y en a, et s'accrochent à eux pour profiter du taxi. Mais la plupart terminent misérablement leur vie dans le gouffre.

1.9.4. Déviation des gouttes d'eau tombant dans un courant d'air

À la cueva Cañuela, juste après «la chatière» de 10 m de large sur l'itinéraire des galeries Sud, on parcourt une galerie au sol bien plat, de hauteur supérieure à 10 m et de 7 ou 8 m de large. Sur le sol on peut observer des traces sombres, allongées dans le sens de la galerie. Ces rayures sont formées par l'impact de gouttes tombant du plafond (cf. photo couverture).

Il ne faut pas longtemps pour comprendre la raison de l'allongement de la trace, c'est le courant d'air omniprésent dans la grotte. La goutte en tombant est déviée par le vent et comme le courant d'air est variable selon l'heure de la journée et l'époque de l'année, la déviation est elle-aussi variable, mais elle est toujours dirigée dans le sens du courant d'air, c'est-à-dire de la galerie.

Ces marques ne sont pas rares, on en trouve partout, il suffit de regarder ! On en a représenté quelques unes sur la courverture de cet ouvrage.

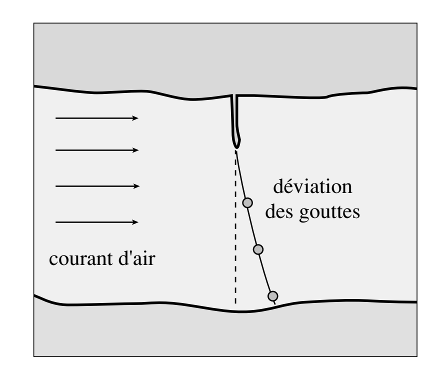


Fig. 1-45- La déviation des gouttes d'eau par un courant d'air (Guiers Mort)

Water drop trajectory deviation by air flow

1.9.5. Les trous oblongs au-dessous de stalactites

De la même manière que le courant d'air est la cause des traces sombres décrites précédemment, il est à l'origine de trous allongés (oblongs) que l'on peut observer à la surface de certains sols argileux. Ces trous, creusés par les gouttes d'eau tombant du plafond, sont appelés trous de stillation (Choppy, 1985b). À la Dent de Crolles, dans la galerie du Solitaire, on peut admirer quelques splendides trous étirés dans le sens de la galerie. C'est la déviation des gouttes d'eau tombant toujours du même endroit (stalactite) qui provoquent cette érosion irrégulière. Si un léger concrétionnement s'en mêle, le trou est fossilisé et pourra témoigner, aux cours des âges, de l'existence d'un ancien courant d'air. On pourra même déterminer la vitesse de ce courant d'air fossile par l'examen des lieux (Lismonde, 1991 b). On verra des traces du même genre sur une photo de la couverture.

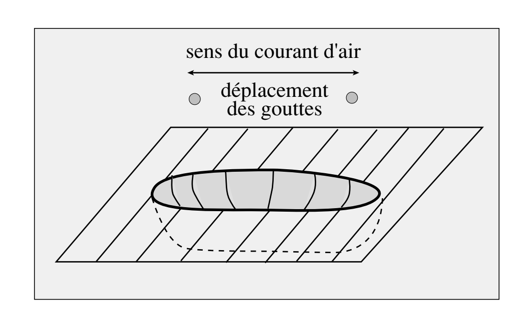


Fig. 1-46- Les trous de stillation rendus oblongs, par la déviation des gouttes dans le vent des grottes

Oblong holes made by water droplets in on air current

1.9.6. Cloche d'air à pression variable (résurgence du Groin dans l'Ain)

Les poches d'air entre deux siphons de niveaux variables voient leur pression varier en fonction des niveaux d'eau, mais le volume de ces poches ne varie que dans une certaine proportion.

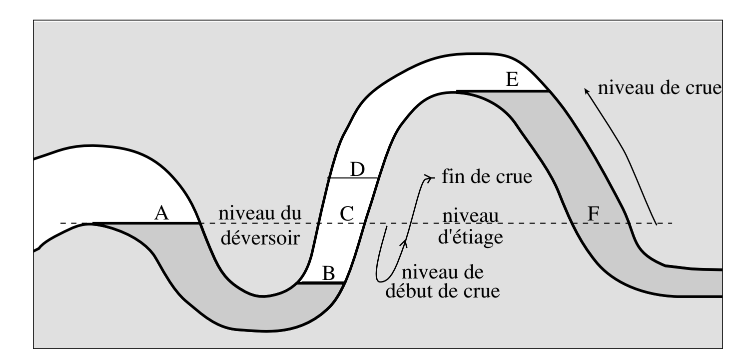


Fig. 1-47- Bouchon d'air
à la résurgence du Groin (Ain)

Spring air cork in Groin

Proposons un exemple possible d'une poche d'air piégée entre deux siphons permanents ne fonctionnant qu'en crue (qui s'applique peut-être au Groin). Les différents niveaux des siphons sont supposés être les mêmes à l'étiage (C), grâce à des fissures minuscules qui assurent la communication des volumes d'eau. En revanche, en crue, ces fissures ne peuvent plus assurer l'équilibrage. On voit alors la chose étonnante suivante. Le niveau du siphon amont se met à monter de F à E (normal pour une crue) mais le niveau amont du siphon aval se met à descendre de C à B, ce qui est plus étonnant. Et le déversoir en E se mettra à fonctionner, mais le niveau B ne pourra remonter au point C à cause de la surpression de la poche d'air. La pression dans le volume d'air augmente de la quantité ρ g h (h étant la dénivellation entre les points A et B). On suppose que la pression en A reste constante. Un plongeur sortant du siphon AB, au cours d'une petite crue, lira au point B sur son manomètre la profondeur h. Mais à la fin de la crue, comme l'air sous pression aura eu tendance à se dissoudre dans l'eau, la quantité d'air de la poche aura diminué. Les fissures entre F et B permettront au niveau E de redescendre vers F. Le niveau après la crue se stabilisera au voisinage de D et non de C. La poche d'air sera en sous-pression. Le plongeur sortant au D lira sur son manomètre une altitude positive h'. Progressivement, le dégazage de l'eau permettra à la poche d'air de retrouver une pression normale. Ce dispositif fait partie de systèmes appelés chambres de Torricelli (Choppy, 1985b).

1.10. Effets acoustiques d'un courant d'air

1.10.1. Un courant d'air bruissant, le puits du Cabri en bas du P 40 à la Dent de Crolles

En bas du puits d'entrée du P 40 à la Dent de Crolles, un resserrement conduit au puits du Cabri, lui-même étroit. En bas, quand on lève la tête vers le haut, on reçoit le vent en pleine figure. On entend distinctement le bruit de la turbulence. Le son est très sourd, mais fluctuant. Si on enlève la tête du passage, on n'entend plus rien. Le bruit est donc bien causé directement au voisinage de la tête.

Il est produit sans doute par le passage de tourbillons au niveau de l'oreille. Ce phénomène est bien connu en mécanique des fluides. On le retrouve dans le chant des lignes électriques dans un vent. La relation fournie par Bénard-Von Karman lie la fréquence (en Hz), la vitesse (en m/s) et le diamètre du fil (en m) : $f = 0{,}215\ U / D$

À moins d'avoir «l'oreille absolue», cette observation ne permet pas d'en déduire la vitesse. Mais il semble que ce phénomène se produise pour une vitesse de courant d'air supérieure à 2 m/s.

1.10.2. Courant d'air dont le bruit évoque un cours d'eau

Dans certaines publications, on lit une description de cavité qui se termine sur étroiture avec fort bruit d'eau derrière (par exemple, Montoriol-Pous, 1966). Quelquefois, on parle même de rivière souterraine, et on comprend le dépit des spéléos de ne pas pouvoir l'explorer. Mais assez souvent, ce fameux bruit de rivière est simplement le ronflement du courant d'air dans la fissure. L'illusion peut être complète, surtout quand la fissure est longue et que le bruit vient d'un peu loin. Cette distance favorise les sons graves, les basses fréquences, et ce sont justement eux qui sont caractéristiques des bruits d'eau. Quand la fissure est ouverte et que le passage est possible, le son change et ne ressemble plus à de l'eau.

Un bon exemple de ce genre de bruit est le gouffre TC, le Trou qui Chante sur les lapiaz du Liet dans les Pyrénées que nous avons ouvert à coups d'explosifs en 1989. Le son a changé, a diminué depuis. Ce gouffre n'a d'ailleurs guère payé.

1.10.3. Ronflement à la chatière de jonction Tonio - Cañuela

J'étais avec Éric Dedieu et nous explorions, en les équipant, les puits de la Sima Tonio dont nous avions ouvert la trémie de blocs qui empêchait le passage (14 août 1987). Au sommet d'un puits de 25 m de profondeur, nous avons entendu une sorte de grondement continu provenant du bas du puits. Une fois descendus en bas, nous avons aperçu un peu plus loin l'origine du bruit. La galerie disparaissait dans un trou noir de 1 m de diamètre et c'est le courant d'air de trois à cinq mètres cubes par seconde qui produisait ce bruit, moins sourd de près que de loin.

Tout naturellement, nous installâmes nos capuches comme si nous allions affronter une cascade et réellement la bourrasque qui attendait celui qui allait planter les deux spits était aussi glaciale qu'une cascade. En bas, se trouvait la récompense de nos efforts car le trou noir était la salle Guillaume à la Cañuela, une des plus grande d'Espagne avec ses 300 m de long ...

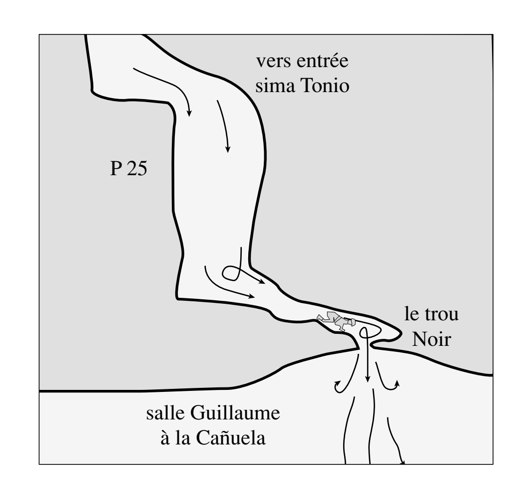


Fig. 1-48- Le grondement du trou Noir à la sima Tonio
Le bruit s'entendait déjà au sommet du P 25 !

Roaring wind in the black hole at Sima Tonio

1.10.5. Détonations pendant les crues

Les crues mettent en œuvre des puissances colossales et il n'est pas étonnant de pouvoir rencontrer des phénomènes acoustiques violents. On cite en Dordogne le trou du Canon qui émettrait de grands bruits au moment des crues.

Contentons-nous de proposer une configuration qui offre des possibilités de phénomènes très bruyants.

Mécanisme possible d'un trou explosant pendant les crues. La crue provoque une montée du niveau piézométrique. L'eau remonte dans le volume V_1 et comprime l'air qui repousse un peu d'eau du siphon. La limite avant le désamorçage du siphon est atteinte quand le niveau piézométrique est égal à H = h'+ h. La surpression dans la chambre est alors égale à ρ g h.

Au moment où le niveau piézométrique augmente encore un peu, le siphon ABC se désamorce brutalement et si la hauteur h est supérieure à 10 m, la pression absolue dans le volume V_2 est supérieure à 2 bars. Alors, l'écoulement s'accompagne d'ondes de choc, générant comme une détonation. La condition nécessaire pour obtenir une détonation est, en plus d'une configuration géométrique favorable, que le niveau piézométrique monte de plus de 10 mètres.

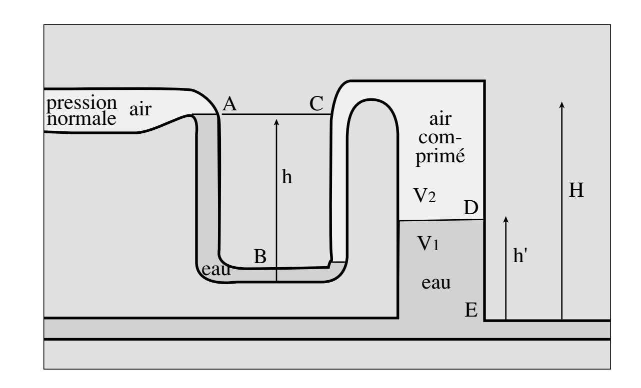


Fig. 1-49- Détonation possible pendant une crue, suite au désamorçage brutal d'un siphon

Detonation during a flood by sump impriming

Cette configuration ne permet qu'une seule détonation par crue. La durée de l'évacuation de l'air peut être très petite.

L'eau qui a été mise en mouvement peut impacter sur le fond de la chambre ce qui peut générer un magnifique coup de bélier dont le bruit se transmettra loin dans la roche. Là, il n'est pas besoin d'une grande mise en charge. Mais la génération d'une détonation par un coup de bélier nous éloigne des courants d'air.

1.11. Chimie

1.11.1. Un trou qui souffle du dioxyde de carbone

À Labastide de Virac, près du célèbre village d'Orgnac, les spéléos locaux ont trouvé un trou souffleur de quelques litres par seconde au bord du chemin. Ils se sont empressés de l'agrandir car en dessous il y a les prolongements de la grotte d'Orgnac à trouver. Le trou s'est creusé à coup de tirs de mines et a atteint deux mètres de profondeur. Malheureusement pour les spéléos, le courant d'air transporte une bonne quantité de dioxyde de carbone (4%). Tant que le chantier était extérieur, cela ne gênait guère. Mais le trou se creusant, l'effet a augmenté et le spéléo au bout du chantier se trouvait incommodé. Finalement, ils ont renoncé à poursuivre la désobstruction et le trou est maintenant couvert d'une tôle et souffle sur le visage du promeneur curieux, qui soulève le couvercle et respire, en se penchant pour voir le fond, un air tiède mais délétère. (Je remercie Philippe Morel et les spéléos d'Orgnac qui m'ont conduit à l'entrée le 30/9/95).

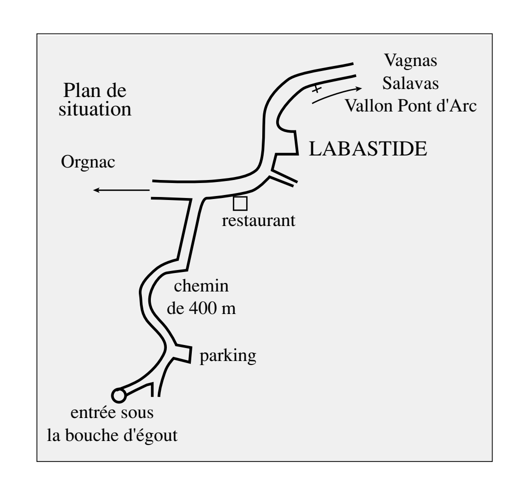


Fig. 1-50- Trou qui souffle du dioxyde de carbone en Ardèche

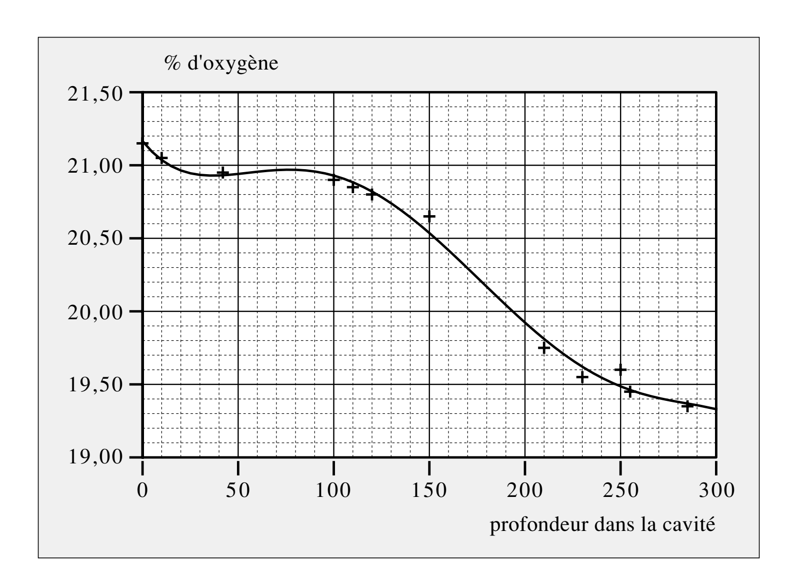
Hole blowing carbone dioxide in Ardèche

1.11.2. Manque d'oxygène au puits de l'Ours (Caudiès-de-Fenouillère, Pyrénées Orientales)

Bernard Ournié explore le réseau des Fanges-Paradet (Pyrénées Orientales). Un gouffre situé au-dessus du réseau leur a permis d'atteindre la cote -286 m. La partie supérieure du gouffre jusqu'à -100 est bien ventilée (régime de point bas d'un système à deux entrées) mais le bas du réseau l'est beaucoup moins. L'existence de CO_2 dans la région et la sensation d'une respiration pénible incitèrent B. Ournié à faire des mesures d'oxygène (Ournié, 1998).

Fig. 1-51- La teneur en oxygène au puits de l'Ours diminue avec la profondeur (mesures B. Ournié)

Oxygen concentration in Ours pitch. Oxygen depletion versus depth in a pot



La teneur en oxygène diminue régulièrement et atteint au fond seulement 19,35 % au lieu de 21% dans l'atmosphère. Le dioxyde de carbone n'est pas très important. C'est le rapport oxygène/azote qui diminuerait dans cette cavité. B. Ournié explique ce déficit par le fait que l'air surchargé de dioxyde de carbone présente une teneur en oxygène appauvrie par rapport à l'air extérieur. Cet air peut perdre ce gaz par dissolution dans l'eau, d'où l'appauvrissement en oxygène.

On analysera dans le tome 2 (§ 4.3.6) les différents processus qui font varier la composition de l'air des grottes.

1.11.3. Rôle de l'air dans les dépôts de calcite : construction des gours

L'eau qui a transité par les sols et qui a circulé dans des conduits noyés se trouve souvent saturée en bicarbonate. Quand cette eau débouche au plafond d'une galerie à l'atmosphère ventilée, il se produit un déplacement de l'équilibre chimique. Le dioxyde de carbone en excès dans l'eau a tendance à s'échapper dans l'atmosphère de la grotte. Alors, du carbonate de calcium se dépose sous forme de stalactites ou de stalagmites.

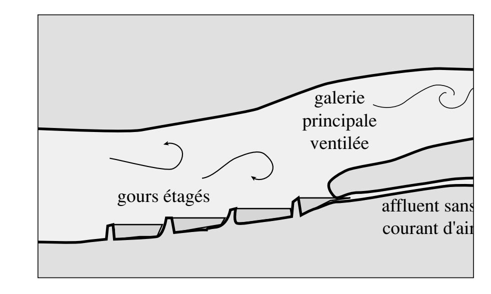


Fig. 1-52- Dégazage de l'eau d'un affluent dans un collecteur : formation des gours

Carbone dioxide expulsion from water in an affluent : rimstone pool formation

Si l'eau débouche dans la galerie sous forme d'un petit ruisseau, il aura tendance à former des gours étagés comme les rizières du sud-est asiatique. De magnifiques exemples peuvent être observés à la grotte Chevaline en Vercors, au gouffre Berger à -500, à la rivière de Chauveroche dans le Jura … Le courant d'air dans la galerie n'a pas besoin d'être fort, il suffit qu'il renouvelle l'air de la grotte.

Cette construction de gours n'a jamais été étudiée soigneusement. On tient là un magnifique sujet de recherche : par quelle rupture de symétrie, le dégazage et le dépôt continu d'une pellicule de calcite conduisent à une certaine longueur d'onde du gour ? Mais le rôle de l'air semble secondaire dans l'affaire.

1.11.4. Dépôts de tuf à la sortie des exsurgences

L'eau en sortant de certaines grottes dépose du tuf, sorte de calcite mélangée à des végétaux bientôt fossilisés dans cette roche légère et tendre. Ces tufs peuvent constituer d'élégantes cascades pétrifiées à l'extérieur de la grotte.

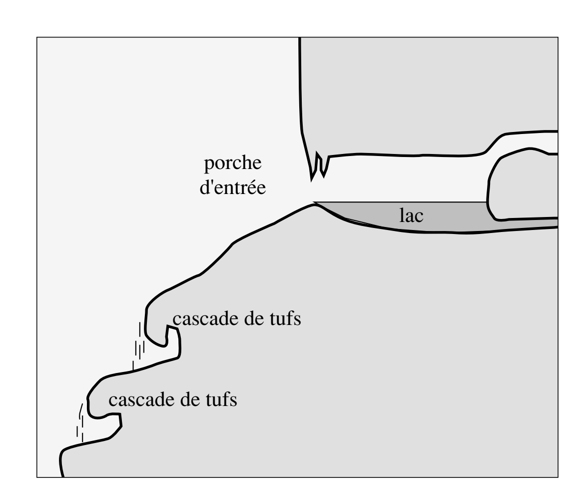


Fig. 1-53- Formation de tufs à l'émergence de Gournier (Isère), avant le désamorçage du siphon

Tufa formation at the Gournier resurgence

Ces formations peuvent s'expliquer, au moins partiellement, en supposant que l'air de la grotte n'est pas renouvelé, donc qu'il est un peu plus chargé en dioxyde de carbone que l'air extérieur à cause de l'apport continuel par l'eau. Des formations organiques contribuent peut-être aussi à ce phénomène en récupérant le dioxyde de carbone de l'eau. Des exemples célèbres et nombreux existent, comme les tufs au dessous de la grotte de Gournier en Vercors ou ceux de Pamukkale en Turquie (le CO_2 dans ce dernier cas est d'origine thermale).

On verra dans le tome 2 (§ 4.5.1.c) qu'en se plaçant d'un point de vue global (le cycle terrestre du calcium) la formation du tuf est le symétrique de l'action de la végétation sur le karst. En effet, la végétation augmente la pression partielle en CO_2 de l'eau de percolation, ce qui provoque un supplément de corrosion.

Mais à la sortie, l'eau dégaze et restitue ce supplément sous forme de tufs (ou travertins). Philippe Renault (1982) pensait que les tufs ne se forment que dans les karsts couverts de forêts. Suivant les essences, feuillus ou conifères, les résultats sont différents. Il semblerait que le chêne soit le champion quant à la production de CO_2 (longueur des racines ?)

1.11.5. Dissymétrie de la coupe transversale d'une stalactite dans un courant d'air

Dans certaines cavités fortement ventilées comme la Dent de Crolles en Chartreuse ou la cueva Cañuela dans les Cantabriques, les concrétions peuvent prendre une forme effilée parallèlement au sens du courant d'air (Lismonde, 1997). En général, un des bords est lisse alors que l'autre est dentelé en forme de peigne ou de scie. Ces concrétions déformées par le courant d'air sont appelées anémolithes (Shaw,1992, p. 207).

Ce phénomène de dissymétrie est étrange. En effet, dans un tube à vent, le sens du courant d'air s'inverse suivant les saisons et si l'écoulement de l'eau dans la concrétion est régulier, on ne voit pas pourquoi il y aurait cette dissymétrie géométrique. Cette dernière traduit donc une dissymétrie dans le mode de dépôt de la calcite.



Fig. 1-54- Concrétion en peigne dans le courant d'air de la cueva del Agua (Ason, Cantabria, Espagne) traduisant une dissymétrie temporelle dans le concrétionnement (photo B. L.)

Comb stalactite in the Dent de Crolles system because air stream showing a temporel asymmetry in speleothem formation



Fig. 1-55- Concrétions dans le courant d'air : anémolithes à la grotte de Malaval, Lozère
(photo Philippe Guillemin, association Malaval, transmise par Daniel Chailloux)

Anemolith, speleothem in an air flow

C'est un joli sujet d'étude. Patrick Cabrol dans sa thèse (1978, p. 69) donne comme sens de croissance des aiguilles d'aragonite, fichées dans les concrétions de calcite, celui qui est face au vent. Mais ce sens ne parait pas convenir aux excroissances des stalactites. Hill et Forti, dans leur monumentale étude de 1986 (p. 46), indiquent que les excentriques sont déviés dans la direction du courant d'air. Ford et Williams (1989, p. 347) signalent que les concrétions présentent quelquefois des excroissances côté amont du courant d'air. Mais ces auteurs oublient de préciser si ce courant d'air peut changer de sens. Ce détail est important car rares en effet sont les courants d'air unidirectionnels.

On peut penser à plusieurs mécanismes indépendants ou simultanés. L'eau est plus ou moins saturée suivant les saisons car l'activité biologique des plantes est variable le long de l'année (cf. tome 2, § 4.3.7.a). De ce fait, pour un débit d'eau donné, le dépôt est plus ou moins rapide. Ou bien, le débit d'eau dans les concrétions est saisonnier, ce qui expliquerait aussi la dissymétrie.

1.11.6. Observations à la galerie du Solitaire à la Dent de Crolles

C'est pour apporter des éléments à ces hypothèses que je suis allé avec Philippe Cabrejas à la Dent de Crolles le 13 décembre 1992, et nous avons fait les observations suivantes :

Dans la galerie du Solitaire, les concrétions ont toutes les dents du peigne dirigées vers l'aval du courant d'air hivernal (le jour de l'observation), à une exception près. Dans la galerie de jonction, elles sont toutes dans le sens opposé. Dans le Boulevard des Tritons, elles sont plutôt dans le sens hivernal mais il y a plusieurs exceptions. Même mieux, deux ou trois stalactites présentent des dents dans les deux sens ! On voit ainsi que cette sortie rapide n'a pas épuisé le sujet qui reste ouvert.

Les conclusions de cette observation sont les suivantes : les concrétions ont leur section allongée dans le sens du courant d'air. La direction des dents est la même que celle des boursouflures (excroissances bourgeonnantes). Ce sens est souvent le même pour un secteur donné. Mais sauf si on fait appel à des modifications du courant d'air, il n'est pas possible d'affirmer que le sens des dents est celui de l'aval du courant d'air hivernal. D'autres observations devraient être faites. Le phénomène est de toute façon compliqué puisqu'au même endroit on trouve quatre sortes de stalactites. La genèse de la concrétion joue peut-être un rôle et des bactéries sont aussi dans le coup car des taches brunâtres sont visibles au bout de certaines dents des peignes.

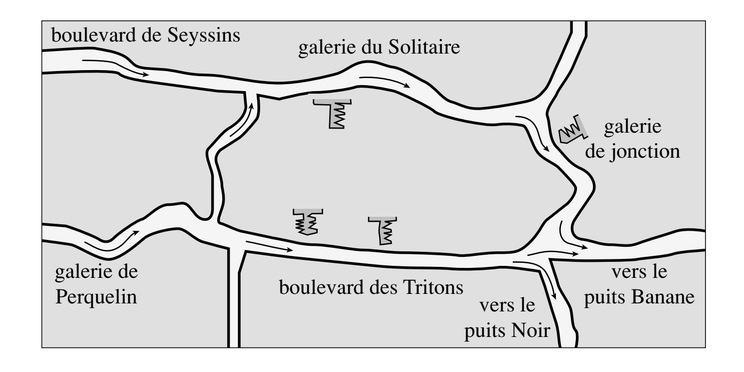


Fig. 1-56- Concrétions et courant d'air hivernal au Guiers Mort (Isère).
Le sens des peignes est à peu près analogue à celui du courant d'air en hiver

Stalactites in winter. The teeth of stalactite are principaly oriented like winter air flow

L'observation faite le 6 février 1995 nous a permis de comprendre le problème du Boulevard des Tritons (cf. 1.5.7). Ce jour-là, nous avons constaté que le bas du réseau pouvait fonctionner pendant l'hiver en régime estival avec une température extérieure voisine de 0°C. Le Boulevard des Tritons a donc un régime de courant d'air très spécial et il ne fallait pas s'en servir pour appuyer une hypothèse sur la genèse des dents.

1.11.7. Modifications du courant d'air inscrites dans les concrétions : Gournier et Pinargözü

À la grotte de Gournier, lorsqu'on est sur la vire au bout du lac d'entrée, on peut admirer des concrétions qui pendent du plafond au-dessus du lac. Deux d'entre elles sont curieuses et font irrésistiblement penser à l'action du courant d'air.

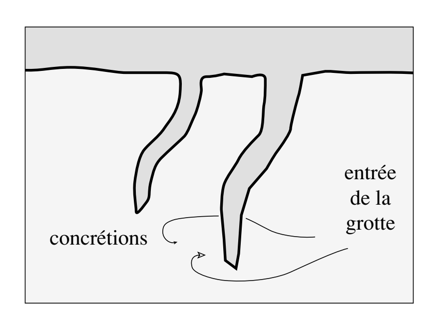


Fig. 1-57- Vieilles concrétions, témoins d'un paléo-courant d'air à Gournier

Old stalactite formed by paleo air flow in the Gournier entrance

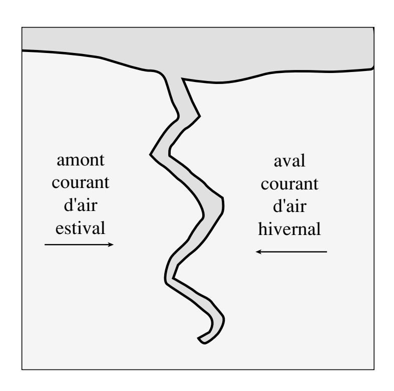


Fig. 1-58- Drôle de concrétion au Pinargözü (Turquie, Bakalowicz, 1972))

Strange stalactite in Pinargözü cave (alternating air flow ?)

À les observer, on voit qu'il y a eu deux phases : l'une, où le courant d'air fonctionnait et où il déviait les concrétions (en hiver), l'autre, ultérieure où il n'y avait pas de courant d'air, puisque le bas des concrétions est rectiligne. Cette observation semble montrer l'existence d'un paléo courant d'air à la grotte de Gournier. Le courant d'air, créé artificiellement à partir de 1992, n'est donc pas si nouveau que ça !

On a déjà parlé de la grotte de Pinargözü en Turquie (cf. § 1.2.2). Dans cette grotte, Michel Bakalowicz pense avoir observé une concrétion à croissance très rapide qui aurait enregistré les inversions du courant d'air tous les 6 mois. Le schéma est très démonstratif, la croissance de la concrétion serait d'une dizaine de centimètres par an, une sorte de record là-encore.

1.12. Difficultés à utiliser au mieux les courants d'air ?

1.12.1. Comment juger de l'intérêt d'un trou souffleur ?

La cavité qui souffle présente un intérêt spéléologique si le courant d'air provient des régions profondes du karst. Si le courant d'air traduit juste une circulation sous le lapiaz, l'intérêt semble minime. Pour le savoir, le meilleur indicateur est la température. Dans une région donnée, les cavités profondes ont une température relativement constante au cours de l'année. Un thermomètre permettra de savoir si le courant d'air vient de loin.

Mais dans le cas où l'air qui provient des réseaux profonds se mélange à un air dont le parcours est minuscule, la mesure de la température à la sortie de l'air ne suffit pas pour démontrer l'intérêt ou non du trou souffleur.

Examinons le cas du scialet des Plongeurs (schéma ci-contre). L'entrée souffle un bon courant d'air. La température à la sortie montre une bonne variation au cours de l'année ce qui pouvait laisser penser au faible intérêt du trou. En effet, la roche froide de la trémie, assez ouverte, est la cause d'une circulation d'air qui sort au bas de l'éboulis. La dénivellation dans la trémie est faible, mais le débit d'air froid est important (jusqu'à un mètre cube par seconde).

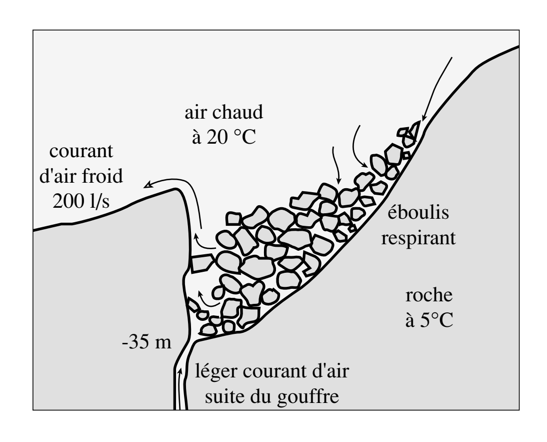


Fig. 1-59- Le trou des Plongeurs et son éboulis froid à Lans-en-Vercors (Isère)

Air flow in a cold scree at trou des Plongeurs

En tout cas, un gros chantier a été entrepris dans cette cavité pour rejoindre le collecteur du Bruyant, suivant la devise chère aux explorateurs : où il y a une volonté, il y a un passage ! La découverte au bas de la trémie d'un léger courant d'air provenant des zones profondes a démontré que le critère de la température n'était pas infaillible. Peut-être que malgré tout, ce trou était prometteur ! La profondeur atteinte de 85 m n'est certes pas insignifiante mais aucun grand réseau n'a encore été atteint (Arnoult 1999). Les pessimistes ont eu raison, mais cela valait la peine d'essayer.

Le courant d'air des profondeurs ne suffit pas pour arriver au collecteur mythique, il faut aussi un peu de chance !

1.12.2. Courant d'air et prospection en montagne. Le toboggan des Naïades

L'exemple du Toboggan des Naïades est plus positif et nous finirons sur ce beau résultat qui démontre quand même la difficulté d'utiliser le courant d'air à des fins d'explorations.

Dans le Trou qui Souffle, Éric Laroche Joubert a entrepris dans les années 94 de remonter au dessus du puits Méga qui marque la fin du courant d'air dans la galerie de Pâques Sud. Il a ainsi exploré des méandres très étroits et après de nombreux bivouacs, en général seul, il s'est arrêté sur des étroitures sérieuses avec un courant d'air de l'ordre de 100 l/s.

Ensuite, lui et d'autres membres du SGCAF ont prospecté à l'aplomb de son terminus. Et comme le pendage des couches laissait supposer que l'entrée était décalée en remontant la pente, c'est tout un secteur qui a été passé au peigne fin.

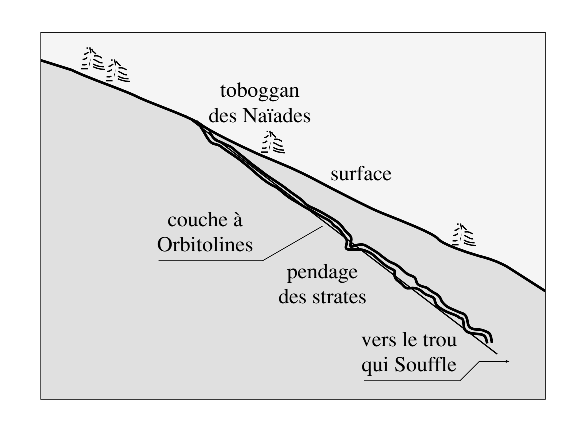


Fig. 1-60- Découverte du toboggan des Naïades (Méaudre, Isère)

Toboggan des Naïades discovery : the snow had melted

Les prospections ont eu lieu l'hiver pour deux raisons. D'une part, en hiver le courant d'air allait vers le haut et un courant d'air soufflant est beaucoup plus facile à trouver qu'un courant d'air aspirant, et d'autre part, l'absence de neige à l'endroit d'un trou souffleur souligne fortement le phénomène. Malgré ces conditions favorables, il a fallu plusieurs séances méticuleuses pour qu'Éric lui-même découvre une petite lacune dans la couche de neige dévoilant quelques feuilles d'arbre (pas de trou). Comble d'ironie, une trace de ski d'un des prospecteurs passait pile sur cette lacune. Éric avait réfléchi. Il était muni d'un thermomètre. À l'extérieur, la température était voisine de 0°C alors que le léger souffle d'air faisait lui 7 °C. Instantanément, il sût qu'il avait gagné. Les autres étaient sceptiques. L'avenir lui donna raison puisqu'un court chantier fit apparaître une galerie pénétrable qui dévalait sur la couche à orbitolines. Une quinzaine de séances d'exploration et de désobstruction furent encore nécessaires pour réussir la jonction avec le Trou qui Souffle.

On voit ainsi la difficulté de trouver la sortie d'un courant d'air, même soufflant, même avec de la neige. Il faut fuir les journées avec du vent, se promener en raquettes sur la neige, s'arrêter tous les mètres carrés, examiner la moindre fissure, ne pas hésiter à sortir le thermomètre. Une zone aussi petite que 500 m x 500 m nécessite pour être fouillée (et en comptant deux passages par mètre carré) un parcours de 500 km de longueur, c'est-à-dire pour un spéléo solitaire et très soigneux 70 séances de prospection. Sachant qu'il n'y a, par an, guère plus d'une petite dizaine de week-ends qui offrent de bonnes conditions (neige, froid et pas de vent), cela représente sept ans pour écrémer totalement un secteur aussi minuscule !

1.12.3. Courant d'air et secours en grotte

Certains accidents ont lieu dans des gouffres étroits et l'évacuation du blessé nécessite des travaux d'agrandissement. Ayant été blessé par une chute de pierre dans un grand puits de la grotte du Jibé, j'ai pu expérimenter moi-même les problèmes. Dans cette grotte très étroite, située dans la falaise de la Dent de Crolles, le courant d'air était aspirant et le bles-

sé et ceux qui l'assistaient étaient dans les gaz consécutifs aux dynamitages. La solution choisie par Albert Oyhancabal a été d'utiliser des groupes électrogènes extérieurs et de procéder à des micro-tirs avec une fréquence assez faible (toutes les heures environ) permettant au courant d'air de renouveler l'atmosphère. Il a tout de même fallu 3 jours pour ouvrir le passage…

De la même façon, au Trou qui Souffle, l'agrandissement du réseau des Saints de Glace pour évacuer un blessé (qu'il ne fallait pas dresser à la verticale) a nécessité de longues séances. Dans ce cas pour lequel le courant d'air était soufflant, le blessé était à l'abri, mais pour aller plus vite, les sauveteurs se sont échelonnés le long du trajet et ont entamé plusieurs chantiers simultanément. Il est bien évident que les équipes situées vers la sortie recevaient les gaz des tirs et des perforatrices à essence et, malgré l'abondance du débit du courant d'air du Trou qui Souffle, plusieurs sauveteurs ont été intoxiqués. La présence de détecteurs de CO est indispensable dans de telles opérations.

En l'absence de courant d'air, un secours dans une cavité étroite est toujours problématique. On développera dans la partie suivante les notions à connaître pour des dynamitages en cavité non ventilée (§ 2.2.D).

Conclusion de la première partie

La description en situation de quelques phénomènes climatiques rencontrés dans les grottes et les gouffres n'épuise pas du tout le sujet. Bien d'autres observations curieuses et souvent incomprises ont été décrites dans la littérature spéléo. Nous n'y avons pas fait appel pour une simple question de cohérence.

Jetons un regard en arrière pour voir ce que cet ensemble de récits nous montre du climat souterrain, mais aussi quels sont les grands phénomènes absents de ces récits. Avec le titre du tome 1 contenant le mot vent, il n'est pas étonnant que les courants d'air soient bien représentés. C'est effectivement le facteur du climat souterrain le plus intéressant pour un spéléo. D'autres phénomènes aussi sont décrits car bien visibles dans les cavités : glace aux entrées, brouillard dans les grandes salles, embruns près des cascades. Les grands absents, ce sont les phénomènes qui demandent des mesures ou de l'abstraction. La température et la pression jouent pourtant un grand rôle en climatologie, mais c'est dans le tome 2 que ces caractéristiques prendront toute leur importance. Les transferts de chaleur et de masse s'observent néanmoins assez facilement tant qu'on reste près des entrées des cavités, mais les grandes migrations de dioxyde de carbone, si importante pour la cinématique du creusement du karst, une des grandes particularité du climat souterrain, échappent à l'observation courante. Nous leur rendront justice au deuxième tome.

Deuxième partie

Le kaléïdoscope des 317 questions

Les questions sur le climat souterrain que peuvent se poser les spéléos observateurs

---

Les courants d'air et la climatologie souterraine représentent un véritable défi à la connaissance puisqu'on peut se poser une question presque chaque jour de l'année sans épuiser le sujet !

On s'est limité aux questions qui tiennent en une seule ligne et dont la réponse demande plutôt moins d'une page. À chaque question, un commentaire apportera un début de réponse, ou bien un renvoi au reste de l'ouvrage permettra un approfondissement de la réponse. Dans certains cas, un constat d'ignorance sera fait.

Certaines questions sont élémentaires et leurs réponses évidentes, mais d'autres sont d'une redoutable difficulté. En réalité, nous n'avons mis aucune limitation à la difficulté des questions et cette partie permet d'aborder, certes superficiellement, des problèmes pratiquement jamais abordés dans l'étude de la climatologie souterraine.

On a fait la distinction entre des questions usuelles (placées au début) et des questions plus techniques ou scientifiques (placées à la fin).

L'accès aux questions se fera plus commodément à partir de l'index alphabétique à la fin de l'ouvrage.

Nous ne nous sommes pas limités aux questions intéressant la karstologie, mais aussi aux questions que peuvent se poser les spéléos explorateurs ou secouristes.



Conduit d'aérage, avec ou sans déflecteur.

A : Conduit sortant du puits – B : Planche à l'orifice d'un conduit ne sortant pas du puits.

Fig. 2.0- Gravure tirée du Agricola (1556) montrant le matériel d'extraction, ainsi que le soucis constant des maîtres-mineurs d'aérer les galeries de mine en profitant du vent. Les mines de l'époque étaient fort polluées !

2.1. La liste des questions usuelles

A- Origine des courants d'air

A-1- Quelles sont les causes principales de courant d'air dans un trou ?
A-2- Les courants d'air souterrains proviennent-ils principalement du vent extérieur ?
A-3- Le vent extérieur peut-il engendrer un courant d'air souterrain ?
A-4- Comment un vent extérieur peut-il provoquer un effet piston, un effet sifflet ?
A-5- Un vent extérieur peut-il générer, dans un tunnel horizontal, une vitesse supérieure à celle du vent ?
A-6- Qu'appelle-t-on effet de cheminée ?
A-7- Qu'est-ce qu'un tube à vent ?
A-8- Comment identifier un tube à vent ?
A-9- Que peut-on dire d'une entrée avec courant d'air soufflant et tiède ?
A-10- Que peut-on dire d'une entrée avec courant d'air soufflant et froid ?
A-11- Que peut-on dire d'une entrée avec courant d'air aspirant ?
A-12- Quelles sont les causes de l'arrêt brutal d'un courant d'air ?
A-13- Une grotte à une seule entrée peut-elle souffler (ou aspirer) ?
A-14- Les variations de pression atmosphérique peuvent-elles engendrer des courants d'air ?
A-15- Les fluctuations de la pression atmosphériques se retrouvent-elles dans les cavités ?
A-16- Quelle est la vitesse des variations de la pression atmosphérique ?
A-17- Qu'appelle-t-on respiration des cavernes ?
A-18- Qu'est-ce qu'un puits soufflant ?
A-19- Que se passe-t-il au passage d'un front orageux ?
A-20- Les infrasons générés par les séismes se traduisent-ils par des courants d'air alternatifs ?
A-21- Les marées terrestres engendrent-elles des courants d'air ?
A-22- Qu'est-ce que la convection naturelle ?
A-23- Qu'est-ce qu'une cellule convective ?
A-24- Quelles sont les conditions pour qu'apparaissent des cellules de convection?
A-25- Peut-il y avoir convection naturelle dans une salle de température uniforme ?
A-26- Quel est le débit d'air entraîné par une cascade ?
A-27- Comment une crue provoque-t-elle l'apparition d'un courant d'air dans une grotte sans courant d'air ?
A-28- Quel est le débit d'air engendré par la mise en charge d'un réseau ?
A-29- Qu'est-ce qu'un courant d'air de recirculation ?
A-30- Qu'est ce que l'effet de trompe pour un écoulement d'eau ?
A-31- Connaît-on des exemples de courants d'air générés par un effet Venturi ?
A-32- Qu'est-ce qu'un aéro-éjecteur ?

B- Description de courants d'air

B-1- Pourquoi les trous souffleurs sont-ils plus nombreux que les trous aspirateurs ?
B-2- À quel endroit, le long d'un tube à vent, trouvera-t-on la vitesse la plus élevée ?
B-3- À quel endroit, dans la section d'une galerie, le courant d'air est-il le plus fort ?
B-4- Pourquoi certains courants d'air s'inversent-ils suivant les saisons ?
B-5- En combien de temps un courant d'air peut-il s'inverser ?
B-6- Qu'appelle-t-on régime estival ou hivernal pour le courant d'air d'un tube à vent ?
B-7- Comment expliquer des trous soufflants toute l'année ?
B-8- Une entrée peut-elle être aspirante toute l'année ?
B-9- Quel est le courant d'air dans un réseau parallèle à une pente, en communication avec la surface ?
B-10- Comment se distribuent les courants d'air dans un réseau à multiples galeries ?
B-11- À quelle différence de pression correspond une dénivellation donnée ?
B-12- Écart de pression pour une différence des températures intérieure extérieure et une hauteur données ?
B-13- Quelles sortes de vitesses d'air rencontre-t-on sous terre ?
B-14- En tube à vent, quelle est la vitesse mesurable dans l'étroiture la plus sévère ?
B-15- Qu'est-ce qui limite la vitesse du vent dans un tube à vent ?

B-16- Quel est le profil des vitesses dans une section de galerie ?
B-17- Quels phénomènes se produisent aux virages des galeries ?
B-18- Qu'appelle-t-on décollement pour un courant d'air ?
B-19- Un courant d'air soufflant est-il toujours associé à un courant d'air aspirant de débit égal ?
B-20- À quelle vitesse une augmentation ou une diminution de pression se propage-t-elle dans un gouffre ?
B-21- Un courant d'air peut-il couler comme de l'eau ?
B-22- Quel est l'ordre de grandeur de la vitesse d'une cellule convective (connaissant les températures) ?
B-23- Qu'est-ce qu'un courant de gravité ou courant de densité ?
B-24- Qu'est-ce qu'un piège à air froid, à air chaud ?
B-25- En quelle saison, un piège thermique est-il parcouru par un courant d'air (période ouverte) ?
B-26- Comment être sûr qu'une cavité est un piège thermique ?
B-27- Existe-t-il des pièges thermiques dans un tube à vent ?
B-28- Les pièges à air froid et les pièges à air chaud ont-ils des fonctionnements symétriques ?
B-29- Pourquoi certains courants d'air restent-ils cantonnés au voisinage du sol des galeries ?
B-30- Pourquoi trouve-t-on des courants d'air de sens différents au sol et au plafond ?
B-31- Qu'appelle-t-on stratification ?
B-32- Quelles sont les causes de stratification d'un courant d'air ?

C- Courants d'air et recherche de première en spéléo

C-1- À quoi sert l'observation des courants d'air ?
C-2- Comment le courant d'air peut-il guider le spéléo dans ses explorations ?
C-3- Dans la recherche d'une jonction entre deux cavités, comment observer les courants d'air ?
C-4- Pourquoi les courants d'air constituent-ils la clé des traversées spéléos ?
C-5- Comment repérer en prospection un trou souffleur, un trou aspirateur ?
C-6- A-t-on intérêt à prospecter les jours de crues (sur une idée de Robert Thérond)?
C-7- Comment se présentent les courants d'air ?
C-8- Quelle poudre utiliser pour visualiser un courant d'air ?
C-9- Comment être sûr de la présence d'un courant d'air dans une galerie ?
C-10- Quels sont les endroits à éviter pour vérifier l'existence d'un courant d'air ?
C-11- Comment sentir le courant d'air à l'entrée d'une trémie ?
C-12- A-t-on intérêt, pour l'exploration, à mesurer la vitesse et le débit des courants d'air ?
C-13- Comment savoir si un courant d'air est celui d'un tube à vent ou d'une respiration de la caverne ?
C-14- À partir de quelle vitesse, un courant d'air peut-il être jugé intéressant ?
C-15- Comment déterminer la dénivellation des deux entrées d'un réseau à courant d'air ?
C-16- Quels sont les débits de courant d'air qu'on peut rencontrer sous terre ?
C-17- Pourquoi une galerie devient-elle impénétrable ?
C-18- Une trémie est-elle un gros obstacle pour un courant d'air ?
C-19- Quel rapport entre une désobstruction et un courant d'air ?
C-20- Quelle est la cause du bruit d'un courant d'air ?
C-21- Y a t'il une relation entre le bruit et la vitesse d'un courant d'air ?
C-22- Comment prévoir le sens d'un courant d'air dans un réseau avec des étages connectés à la surface ?

D- Spéléo et courant d'air

D-1- Comment trouver la sortie d'un courant d'air ?
D-2- Quelles seraient les applications du traçage d'un courant d'air ?
D-3- Comment utiliser un altimètre sous terre ?
D-4- Un altimètre est-il utilisable lorsque la cavité est parcourue par un courant d'air ?
D-5- Quelle correction doit-on apporter à la mesure de profondeur avec un altimètre ?
D-6- Un courant d'air peut-il être toxique ?
D-7- Quel est le seuil de toxicité des principaux gaz dangereux ?
D 8- Comment peut-il se produire un déficit d'oxygène ?
D-9- Peut-on contrôler la teneur en oxygène par l'extinction de la flamme acétylène ?
D-10- Quels appareils trouve-t-on pour mesurer le CO_2 ?
D-11- Quelle est la température maximale pour explorer une cavité ?

D-12- Peut-on dynamiter dans une cavité sans courant d’air ?
D-13- Comment dynamiter quand le courant d’air est soufflant ?
D-14- Qu’appelle-t-on niche de pressurisation dans la sécurité des mines ?
D-15- Comment les maîtres mineurs pouvaient-ils aérer leurs conduits avant l’invention des ventilateurs ?
D-16- Peut-on créer artificiellement un courant d’air dans une cavité ?
D-17- Quelle quantité de dioxyde de carbone un spéléo produit-il ?
D-18- Combien de temps un spéléo au repos peut-il survivre dans un mètre cube d’air ?
D-19- Quelles sortes de gaz le carbure produit-il ?
D-20- Quels gaz, la combustion de l’acétylène produit-elle ?
D-21- Comment ventiler une galerie au cours d’un sauvetage ?
D-22- Comment ventiler une galerie pour évacuer les gaz de dynamitage ?
D-23- Peut-on faire du feu sous terre ? Dangers d’incendie liés à l’essence
D-24- Quelle quantité de CO produisent détonateurs et cordeau détonnants ?
D-25- Comment varient les symptômes en fonction de la durée d’exposition au CO ?
D-26- Comment détecter le monoxyde de carbone ?
D-27- Qu’est-ce que l’onde de choc issue d’une explosion ?
D-28- Une salle peut-elle être soumise à une compression de l’air ?
D-29- Peut-on ressentir la narcose à l’azote, l’hyperoxie dans une cloche sous pression ?
D-30- Y a-t-il risque d’hypoxie dans une cloche d’air au cours d’une plongée ?
D-31- L’air piégé dans une cloche au cours d’une crue est-il respirable ?
D-32- Quelle est la représentation conventionnelle du courant d’air sur les topographies ?

E- Phénomènes thermiques

E-1- Quelle relation y a-t-il entre la température moyenne d’un lieu et celle d’une cavité ?
E-2- Quelles sont les modifications apportées par un courant d’air au climat souterrain ?
E-3- Quelle est l’influence de l’eau de percolation sur la température de la roche des cavités ?
E-4- Qu’est-ce que la convection ?
E-5- Le courant d’air dans un tube à vent peut-il être assimilé à une convection ?
E-6- Peut-on avoir un tube à vent à deux entrées de même altitude ?
E-7- Comment fonctionne un tube à vent en U avec deux entrées d’altitudes égales ?
E-8- Quels sont les écarts de température entre le courant d’air et la paroi des galeries ?
E-9- Quelle est la répartition des températures en profondeur dans une paroi de grotte à un instant donné ?
E-10- Quelles sont les variations de température d’une grotte au cours de l’année ?
E-11- À partir de quelle distance des entrées, la température reste-t-elle constante au cours de l’année ?
E-12- Jusqu’à quelle profondeur, une pluie influence-t-elle thermiquement la roche ?
E-13- Jusqu’à quelle profondeur, la température de la surface influence-t-elle la température de la roche ?
E-14- Pourquoi en montagne, les trous souffleurs l’été sont plus froids que les grottes avoisinantes ?
E-15- Pourquoi un trou qui souffle l’été, exhale-t-il un air plus froid que la température profonde de la grotte ?
E-16- Pourquoi les trous aspirateurs l’été sont-ils plus chauds que les trous avoisinants ?
E-17- Qu’est-ce que le degré géothermique ?
E-18- Quelle est la valeur du flux géothermique ?
E-19- Quelle augmentation de la température de l’eau des émergences, ce flux provoque-t-il ?
E-20- Comment s’effectue le transfert du flux géothermique à l’eau ?
E-21- La température dans un gouffre augmente-t-elle ou diminue-t-elle avec la profondeur ?
E-22- Dans une galerie non ventilée, les températures de l’eau et de l’air sont-elles identiques ?

F- Les courants d’air et l’eau

F-1- Pourquoi l’atmosphère des grottes est-elle le plus souvent saturée d’humidité ?
F-2- Quelles sont les causes d’apparition d’un brouillard ?
F-3- Pourquoi y-a-t-il un brouillard dans certaines salles ?
F-4- Pourquoi le mélange de deux airs saturés fournit-il un brouillard ?
F-5- Dans quelles conditions, des fines nappes horizontales de brouillard peuvent-elles apparaître ?
F-6- Quelle est la taille des gouttelettes dans un brouillard ?
F-7- Pourquoi un brouillard arrête-t-il les faisceaux lumineux ?

F-8- L'opacité d'un brouillard traduit-elle la quantité d'eau contenue par le brouillard ?
F-9- Pourquoi le brouillard peut-il disparaître ?
F-10- Pourquoi la quantité de vapeur que peut contenir l'air est limitée ?
F-11- Quelle quantité d'eau de condensation, le brouillard peut-il fournir ?
F-12- Qu'est-ce que la courbe de saturation de vapeur dans l'air ?
F-13- Le courant d'air peut-il former des ruisselets par condensation ?
F-14- Dans quelles conditions un courant d'air fournit-il le plus d'eau ?
F-15- Qu'est-ce qu'un air sursaturé ?
F-16- Pourquoi éprouve t-on une impression d'étouffement dans certaines grottes ?
F-17- Pourquoi l'eau se dépose sur les parois dans certains cas, ou forme un brouillard dans d'autres cas ?
F-18- À quoi sont dues les gouttelettes brillantes comme des catadioptres sur certaines voûtes ?
F-19- À quoi est dû un trou qui fume ? Dans quelles conditions un trou pourra-t-il fumer ?
F-20- Pour un courant d'air sortant d'une cavité, à quel endroit du panache naît le brouillard ?
F-21- Pourquoi un courant d'air sur la peau mouillée semble plus froid que sur la peau sèche ?
F-22- Pourquoi les parois de certaines grottes sont-elles très humides ?
F-23- Pourquoi les parois de certaines grottes sont-elles sèches ?
F-24- En quelle saison une entrée basse voit-elle un dessèchement, une humidification des parois ?
F-25- En quelle saison une entrée haute voit-elle un dessèchement, une humidification des parois ?
F-26- Sur quelle distance un courant d'air aspirant l'hiver peut-il dessécher les parois d'une cavité ?
F-27- Comment l'air peut-il se trouver en dépression dans un siphon (chambre de Torricelli) ?
F-28- Quelle vitesse limite est atteinte par l'eau des cascades ?
F-29- Quelle est la vitesse maximale du courant d'air engendré par une cascade sous terre ?
F-30- Quelle surpression peut fournir une cascade remplissant un puits ?
F-31- Quelle vitesse d'air peut-on obtenir à partir d'une surpression donnée ?

G- Les courants d'air, la neige et la glace

G-1- À quoi est due la glace à l'entrée de certains trous ?
G-2- Quelles formes prennent les concrétions de glace ?
G-3- Comment un courant d'air peut-il modeler une paroi de glace ?
G-4- Comment l'air sculpte-t-il des coups de gouges dans la glace, dans la neige ?
G-5- Comment fonctionnent les glacières naturelles ?
G-6- Comment un courant d'air soufflant empêche un trou d'être bouché par la neige en hiver ?
G-7- Un trou peut-il être bouché par la glace, la neige en hiver ?
G-8- Un trou bouché par la neige ou la glace peut-il s'ouvrir à nouveau ?
G-9- Est-ce que le réchauffement de l'atmosphère a une influence sur la neige des trous de montagnes ?
G-10- Peut-il y avoir des avalanches dans les gouffres ? Quand les glaçons tombent-ils ?
G-11- Comment se forment les éboulis de gélifraction ?
G-12- Peut-il y avoir des réseaux à courant d'air dans les glaciers ?

H- Effets mécaniques, dioxyde de carbone et concrétions

H-1- Quelle force le vent exerce-t-il sur une concrétion ?
H-2- Le courant d'air peut-il mettre en oscillation des concrétions ?
H-3- Pourrait-on exploiter l'énergie éolienne du courant d'air ?
H-4- Comment expliquer les traces allongées dans le sens de la galerie dans certaines grottes ?
H-5- Qu'appelle-t-on trous de stillation ?
H-6- Comment pourrait-on savoir qu'un réseau, dépourvu de courant d'air, en a possédé un par le passé ?
H-7- Comment pourrait-on «mesurer» la vitesse de courants d'air fossiles ?
H-8- La composition de l'air est-elle la même dans les cavités et à l'extérieur ?
H-9- Qu'appelle-t-on pression de CO_2 équilibrante ?
H-10- Pourquoi certaines cavités présentent-elles du dioxyde de carbone ?
H-11- Existe-t-il des trous souffleurs de dioxyde de carbone ?
H-12- Où trouve-t-on des émergences de dioxyde de carbone ?
H-13- Le dioxyde de carbone peut-il se décanter ?
H-14- La concentration de CO_2 varie-t-elle pendant la respiration des cavités ?

H-15- Comment se fait la dilution le long d'un courant d'air, d'un gaz toxique généré instantanément ?
H-16- Comment dans une cavité à une seule entrée, l'air peut-il se renouveler ?
H-17- Pourquoi l'eau qui traverse un sol se charge-t-elle en dioxyde de carbone dissous ?
H-18- Quelle est la quantité de dioxyde de carbone dissous dans l'eau quand on connaît celle de l'air ?
H-19- Qu'est-ce que la loi de Henry ?
H-20- Quelles sont les raisons qui expliquent la présence de concrétions dans certaines galeries ?
H-21- Pourquoi trouve-t-on des gours étagés (escalier de gours) à la confluence de certains affluents ?
H-22- Pourquoi certaines émergences construisent-elles des cascades de tuf (sources pétrifiantes) ?
H-23- Pourquoi certaines concrétions sont profilées dans le courant d'air ?
H-24- À quoi est due l'inclinaison de certaines concrétions ?
H-25- Les excentriques peuvent-elles croître dans un courant d'air ?
H-26- Le mondmilch des parois a-t-il besoin de courant d'air pour se former ?
H-27- Où trouve-t-on souvent des dépôts de gypse ?

Questions plus techniques ou scientifiques ?

I- Effet des forces aérodynamiques

I-1- Qu'est ce qu'un écoulement laminaire, turbulent ?
I-2- Pour quelles caractéristiques de l'écoulement se fait la transition ?
I-3- Les courants d'air dans les trous sont-ils laminaires ou turbulents ?
I-4- Quelles sont les forces qui freinent le courant d'air ?
I-5- Qu'est-ce que la dissipation visqueuse ?
I-6- Qu'appelle-t-on perte de charge ?
I-7- Qu'est-ce qu'une perte de charge régulière ?
I-8- Qu'appelle-t-on rugosité équivalente d'une paroi ?
I-9- Qu'est-ce qu'une perte de charge singulière ?
I-10- Qu'appelle-t-on résistance aéraulique d'une galerie ?
I-11- Que vaut la résistance aéraulique de plusieurs galeries en série ?
I-12- Comment trouver la résistance aéraulique de plusieurs galeries en parallèle ?
I-13- Qu'est-ce qu'un gradient de pression ?
I-14- Qu'est-ce que la pression motrice, le gradient de pression motrice ?
I-15- Quelle est la répartition des pressions en fonction de l'altitude ?
I-16- Quelle est l'influence du profil de température de l'atmosphère sur son profil de pression ?
I-17- Quel est le mécanisme global à l'origine du courant d'air d'un tube à vent ?
I-18- Quel principe physique traduit l'équation de Bernoulli ?
I-19- Qu'est-ce que l'effet Venturi pour un courant d'air ?
I-20- Sous l'action de quelles forces motrices locales, le courant d'air se maintient-il ?
I-21- Peut-on calculer en trois lignes la vitesse du vent dans un tunnel de dimensions connues ?
I-22- Peut-on trouver la caractéristique V = f(Text) à partir d'une seule mesure ?
I-23- Pour quelles conditions précises, un courant d'air s'inverse-t-il ?
I-24- Qu'appelle-t-on débit de masse, débit de quantité de mouvement, débit d'énergie ou d'enthalpie ?
I-25- Dans un jet d'air débouchant dans une salle, que valent les différents débits ?
I-26- Qu'est-ce qu'on appelle éjection ?
I-27- Peut-on trouver des aéro-éjecteurs naturels ?
I-28- Qu'est-ce que le blocage sonique ?
I-29- Est-ce que le blocage sonique se manifeste en écoulement diphasique eau-air ?
I-30- L'écoulement d'un fleuve d'air froid est-il du type rivière ou torrent ?
I-31- Existe-t-il des ressauts aérauliques ?
I-32- Qu'appelle-t-on nombre de Mach pour un écoulement ?
I-33- Peut-il exister des courants d'air supersoniques ?
I-34- Quelle sorte de courant d'air engendre une explosion dans une grotte ?
I-35- Peut-on avoir des courants d'air intermittents analogues aux sources intermittentes ?
I-36- La perte de charge occasionnée par une trémie est-elle la même quelque soit la granulométrie ?

J- Effets thermiques

J-1- Comment varie la masse volumique de l'air ?
J-2- Quels rôles jouent les échanges thermiques dans un tube à vent ? Notion de boucle de rétroaction.
J-3- Existe-t-il une relation biunivoque entre température extérieure et débit de l'air ?
J-4- Qu'est ce qu'on appelle effet de mémoire dans un phénomène physique ? (le courant d'air ici)
J-5- Dans quelle configuration, un réseau ne présente pas d'effet de mémoire pour le courant d'air ?
J-6- Configuration de réseau très sensible à l'effet de mémoire
J-7- Quelle rôle joue la convection naturelle dans un tube à vent ?
J-8- Peut-on calculer l'évolution thermique dans une cavité ventilée ?
J-9- Peut-on prévoir la vitesse d'un courant d'air dans une cavité en tenant compte de l'effet mémoire ?
J-10- Combien faut-il d'énergie pour chauffer un kilogramme d'air (à peu près 1 m^3) de 1 °C ?
J-11- Combien d'énergie pour chauffer un kilogramme d'eau de 1°C ?
J-12- Quelle est l'énergie dépensée par une cascade qui tombe de 100 m ?
J-13- De combien augmente alors sa température, et quel est le processus de transformation ?
J-14- Quelle est l'énergie nécessaire pour évaporer un kilogramme d'eau ?
J-15- Quelle est l'énergie nécessaire pour dégeler un kilogramme de glace ?
J-16- À quoi sont dues les variations de la pression atmosphérique ?
J-17- Quel est le temps de renouvellement de l'air d'une cavité ventilée ?
J-18- Quel est le temps de renouvellement de l'air dans une cavité sans courant d'air ?

K- Effets acoustiques, instabilités et stratification

K-1- Qu'est-ce qu'un son ?
K-2- Quelle est la vitesse du son dans l'air (dans l'eau) ?
K-3- Existe-t-il des infrasons dans l'air, et d'où proviennent-ils ?
K-4- Quel est le principe du résonateur de Helmholtz ?
K-5- Quel est le temps typique pour atteindre la résonance ?
K-6- Pourrait-on obtenir la résonance en régime permanent ?
K-7- Quels courants d'air apparaissent dans un résonateur de Helmholtz ?
K-8- Peut-on réunir des conditions d'oscillations pour le courant d'air ?
K-9- Quel est le mécanisme de formation des ondes acoustiques dans un instrument à vent ?
K-10- Comment se propagent les ondes acoustiques audibles dans les galeries ?
K-11- Est-il facile de modifier le chemin d'un courant d'air ?
K-12- Comment une perturbation faible peut-elle entraîner des modifications importantes de sens ?
K-13- Comment un courant d'air peut équivaloir à un bistable ?
K-14- Qu'appelle-t-on stabilité pour une atmosphère donnée ?
K-15- Est-ce qu'une atmosphère isotherme est stable ?
K-16- Qu'est ce qu'une atmosphère adiabatique ?
K-17- Qu'est-ce que le gradient adiabatique sec ?
K-18- Limite de stabilité d'une atmosphère ?
K-19- Instabilité des masses d'air avec une composition chimique variable de l'air ?
K-20- Qu'est ce que l'effet Boycott ?
K-21- Est-ce que l'instabilité de Marangoni joue un rôle ?
K-22- Quelles sont les causes de stratification d'un courant d'air ?
K-23- Qu'est-ce qu'on appelle nombre de Richardson d'un écoulement stratifié ?
K-24- Comment se fait le mélange entre deux flux d'air qui se rencontrent ?
K-25- Comment la stratification atténue-t-elle le mélange turbulent entre deux fluides ?
K-26- Avec quelle vitesse une avalanche d'air plus lourd s'étale-t-elle dans une galerie horizontale ?
K-27- Peut-on proposer un modèle simple des courants de densité ?

L- Air humide, évaporation et chimie

L-1- Qu'est-ce qu'un diagramme psychrométrique ?
L-2- Qu'est-ce qu'un air sursaturé ?
L-3- Comment cesse la sursaturation ?

L-4- Comment l'eau se condense-t-elle sur une paroi ?
L-5- Qu'est-ce que le gradient adiabatique humide ?
L-6- Quels sont les processus d'évaporation de l'eau ?
L-7- L'évaporation de l'eau peut-elle former de la glace dans les glacières naturelles en été ?
L-8- Dans quelle condition l'évaporation de l'eau peut-elle former de la glace ?
L-9- Qu'est-ce que le Föhn ?
L-10- Peut-on observer sous terre des phénomène équivalents au Föhn ?
L-11- Comment se fait l'échappement du dioxyde de carbone de l'eau des concrétions ?
L-12- Comment la tension superficielle eau-air commande-t-elle le diamètre d'une fistulaire ?
L-13- Le courant d'air contient-il des traceurs naturels susceptibles de s'imprimer dans la roche ? O_{18}
L-14- L'air des grottes contient-il des ions ?
L-15- L'air des grottes est-il bénéfique aux asthmatiques et pourquoi ?

M- Phénomènes de transports et systémique

M-1- Qu'appelle-t-on phénomènes de transport ?
M-2- Qu'est-ce qu'un régime permanent, transitoire ?
M-3- Un réseau souterrain est-il un système fermé ou ouvert (au sens de la thermodynamique)?
M-4- Qu'est-ce que l'énergie interne, l'enthalpie d'un fluide ?
M-5- Dans quelle condition une transformation de l'air humide est isotherme, isenthalpe, adiabatique ?
M-6- Pourquoi peut-on dire qu'un réseau parcouru par de l'air est un moteur thermique ?
M-7- Quel est le rendement de ce moteur ?
M-8- Pourrait-on récupérer l'énergie liée au courant d'air ?
M-9- Quel est le volume d'une cavité ?
M-10- Qu'est-ce qu'on appelle système en physique ?
M-11- Qu'appelle-t-on système en analyse systémique ?

2.2. Réponses partielles aux questions

A- Origine des courants d'air

A-1- Quelles sont les causes principales de courant d'air dans un trou ?

Elles sont multiples. On peut citer l'influence du vent extérieur, l'effet de cheminée (thermique) des cavités à entrées multiples, les mises en charge des réseaux souterrains lors des crues, la respiration des cavernes sous l'effet des fluctuations de la pression atmosphérique, les effets de convection naturelle locale due à des différences locales de températures, entraînement par les cascades …

A-2- Les courants d'air souterrains proviennent-ils principalement du vent extérieur ?

En général, non. La plupart des courants d'air sont d'origine thermique.

A-3- Le vent extérieur peut-il engendrer un courant d'air souterrain ?

Oui, par les surpressions et les cisaillements qu'il occasionne au voisinage des orifices des réseaux souterrains.

Cette question est reprise dans le tome 2, § 2.1.2.

A-4- Comment un vent extérieur peut-il provoquer un effet piston, un effet sifflet ?

C'est Claude Andrieux (1970) qui a introduit cette notion. L'effet piston est le courant d'air induit par la surpression de l'air sur un flanc de montagne alors que l'effet sifflet est celui que génère un vent tangent à un orifice de trou.

A-5- Un vent extérieur peut-il générer, dans un tunnel horizontal, une vitesse supérieure à celle du vent ?

Le vent extérieur provoque une surpression (en Pa) de l'ordre de $0,5\ V^2$ (V étant la vitesse du vent exprimée en m/s) et la perte de charge engendrée par un rétrécissement dans un tunnel est de l'ordre de $0,5\ U^2$ (U étant la vitesse du courant d'air). Or il y a souvent plusieurs resserrements. On en déduit que la vitesse U est, la plupart du temps, inférieure à V la vitesse du vent. On peut cependant, dans certains cas invoquer un effet Venturi (question I-22) pour lequel la perte de charge est inférieure à l'expression donnée au-dessus. Dans l'exemple rapporté au § 1.2.4, la vitesse dans l'étroiture est nettement plus petite que la vitesse du vent.

A-6- Qu'appelle-t-on effet de cheminée ?

Le feu produit de la chaleur. L'air s'échauffe à son contact. La masse volumique de l'air chaud est plus petite que celle de l'air froid. La poussée d'Archimède fait monter cet air chaud dans la cheminée. Le tirage de la cheminée (l'appel d'air) est d'autant plus fort que la cheminée est plus haute (et le feu plus fort).

A-7- Qu'est-ce qu'un tube à vent ?

C'est un réseau qui possède deux entrées. Le courant d'air traverse le réseau. Il entre par un orifice et ressort par l'autre. Beaucoup de cavités présentent un courant d'air qui change suivant les saisons. Ainsi au Guiers Mort qui est le point bas du réseau de la Dent de Crolles, le courant d'air est aspirant l'hiver et soufflant l'été. Le phénomène est dû à l'effet de cheminée. Le trou a une température à peu près constante, alors que l'air extérieur est chaud en été et froid en hiver. En hiver, la cavité fonctionne comme une cheminée, l'air froid entre par le bas, l'air chaud s'échappe par le haut. L'été le fonctionnement est inversé. C'est la différence des poids des colonnes d'air dans, et à l'extérieur, de la cavité qui permet de comprendre ce tirage. Lorsqu'un courant d'air fonctionne de cette façon, on dit qu'on a affaire à un tube à vent. Il faut au moins deux entrées pour faire un tube à vent.

A-8- Comment identifier un tube à vent ?

Il est difficile, de prime abord, de savoir si un courant d'air provient d'un effet de cheminée ou d'un autre phénomène. C'est la fréquentation de la cavité qui montrera que le courant d'air est d'autant plus fort que l'écart entre température extérieure et température profonde est plus grand, et c'est le renversement saisonnier du courant d'air qui confirmera l'existence d'un tube à vent. Il est bien sûr possible que le réseau soit plus compliqué qu'un simple tube à vent à deux entrées. Il peut en posséder un grand nombre, mais son comportement sera voisin de celui d'un tube à vent au sens strict.

A-9- Que peut-on dire d'une entrée avec courant d'air soufflant et tiède ?

Une entrée de grotte, soufflant un air plus chaud que l'air ambiant, est en général une entrée supérieure d'un tube à vent, ou d'un système apparenté, fonctionnant en régime hivernal. La colonne d'air intérieure est plus chaude, donc plus légère que celle à l'extérieur. Il y a un effet cheminée. Mais, ce phénomène pourrait aussi traduire la respiration des cavernes en hiver.

A-10- Que peut-on dire d'une entrée avec courant d'air soufflant et froid ?

Un courant d'air soufflant un air plus froid que l'extérieur est souvent le signe d'une entrée basse d'un tube à vent fonctionnant en régime estival.

A-11- Que peut-on dire d'une entrée avec courant d'air aspirant ?

Une entrée avec courant d'air aspirant peut être une entrée basse d'un tube à vent fonctionnant en régime hivernal ou une entrée haute d'un tube à vent fonctionnant en régime estival. Mais d'autres configurations peuvent exister comme la respiration d'un réseau à une seule entrée.

A-12- Quelles sont les causes de l'arrêt brutal d'un courant d'air ?

Un courant d'air qui s'arrête brutalement est le signe qu'un bouchon s'est établi dans le trajet : porte qu'on a fermée, siphon qui s'est amorcé suite à un orage, modification de la température extérieure annulant le courant d'air… Le renversement d'un courant d'air est plus fréquent que son annulation pure et simple.

A-13- Une grotte à une seule entrée peut-elle souffler (ou aspirer) ?

Une grotte à une seule entrée peut souffler ou aspirer sous l'action du vent (courant d'air alternatif) ou, si la grotte est de grand volume, sous l'action des variations de la pression atmosphérique (respiration des cavernes, approche d'orage), ou bien encore, à cause de l'effet piston provoqué par une averse (uniquement en soufflage), ou à cause de la montée du niveau de l'eau consécutive à une crue.

Dans le cas de la respiration des cavernes, et si le courant d'air peut sortir facilement, il n'y a pas de déphasage entre la pression intérieure et la pression extérieure. Le débit du courant d'air se calcule alors simplement (on suppose la transformation isotherme) comme :

$$q = \frac{V}{p}\frac{dp}{dt}$$

avec q en m^3/s, V volume de la cavité en m^3, p pression atmosphérique en Pa ou autre.

S'il y a une perte de charge par exemple à l'entrée de la grotte, cette résistance au passage de l'air introduit un amortissement et un déphasage de la variation de pression à l'intérieur par rapport à l'excitation extérieure. On étudiera ce phénomène dans le tome 2, § 2.5.2.

A-14- Les variations de pression atmosphérique peuvent-elles engendrer des courants d'air ?

Si les variations sont très rapides dans le temps (orage, lignes de grain…) un courant d'air violent pourra apparaître à l'entrée du trou. Ce courant d'air sera toujours soufflant car la pression est toujours décroissante dans ces cas-là. Les remontées de la pression étant en général plus lentes, le phénomène symétrique d'aspiration d'air sera moins fort mais plus long.

Si les variations sont lentes, mais si les volumes concernés sont très grands (10^5 à 10^7 m^3), les variations de la pression engendrent la respiration de la caverne, soufflant quand la pression baisse, et aspirant quand la pression atmosphérique augmente.

L'atmosphère est soumise à des perturbations de pression dont l'origine est principalement l'énergie solaire. Une étude fine des fluctuations de la pression atmosphérique montre une gamme très vaste de phénomènes. Sur la courbe du schéma est représenté le spectre des fluctuations de la pression atmosphérique. Par le procédé simple de la transformée de Fourier (le même procédé mathématique qui permet de décomposer un son en ses différentes harmoniques), on peut visualiser les différents causes des fluctuations de pression.

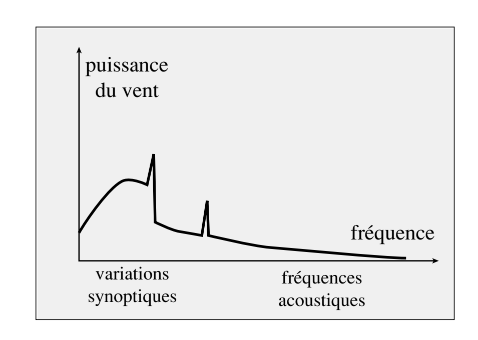


Fig. 2-1- Fréquences des perturbations de pression (schématique)

Sketch of wind pressure spectrum

Les basses fréquences sont dues aux passages de perturbations qui dans nos latitudes se succèdent *grosso modo* au rythme d'une par semaine, ce sont les fluctuations synoptiques. On trouve aussi des fluctuations de pression liées au cycle semi-diurne comme les marées et au cycle diurne. De plus hautes fréquences traduisent des phénomènes plus rapides comme les infrasons générés par les grands courants de la haute atmosphère (*jet-stream*).

A-15- Les fluctuations de la pression atmosphérique se retrouvent-elles dans les cavités ?

On peut simplement dire que les fluctuations se retrouvent en principe dans les cavités. Seules, les très grandes cavités (plus de 100 km) avec des pertes de charge aux entrées présentent un grand amortissement et un déphasage (retard) par rapport à la pression extérieure. Dans les cavités usuelles, les temps de mise en pression sont très courts (de l'ordre de 30 s au Trou qui Souffle de Méaudre). Cette question est traitée dans le tome 2, § 2.5.2.

A-16- Quelle est la vitesse des variations de la pression atmosphérique ?

Nous avons vu que la force du courant d'air dépend en premier de la vitesse de variation de la pression, la dérivée temporelle de la pression (dp / dt). Quelles sont les valeurs usuelles de ce paramètre ? Quand on consulte les archives des services météo (j'ai consulté celles du CTGREF à Grenoble), on trouve que dans nos latitudes, la pression évolue au maximum de 5000 Pa en quelques jours, soit 5% en valeur relative. Les dérivées dp/dt sont le plus souvent inférieures à 0,01 Pa/s, mais exceptionnellement, c'est-à-dire quelques fois par an, on peut observer 0,1 Pa/s juste à l'arrivée d'une dépression.

A-17- Qu'appelle-t-on respiration des cavernes ?

La respiration des cavernes est le courant d'air alternatif qui accompagne les fluctuations de la pression atmosphérique.

A-18- Qu'est-ce qu'un puits soufflant ?

Un puits soufflant est un puits artificiel creusé pour trouver de l'eau, et qui se trouve en communication avec des réseaux de fissures. Souvent, ces puits représentent les seules communications de ces fissures avec l'atmosphère (couche étanche à l'air près de la surface). La respiration de ces cavernes passent donc par ces puits (bien décrits en Normandie, Choppy, 1986).

A-19- Que se passe-t-il au passage d'un front orageux ?

Le front orageux s'accompagne en général d'une baisse rapide de la pression atmosphérique, d'où sortie d'une partie de l'air de la cavité. Les pluies qui accompagnent l'orage remplissent les fissures et provoquent un second courant d'air soufflant.

Réciproquement, si une cavité se met à souffler à l'approche d'un orage, c'est le signe qu'elle est assez importante donc intéressante. Ce signe est un des seuls pour les cavités sans courant d'air (comme les Cuves de Sassenage en Isère, grotte qui fait tout de même 9,2 km).

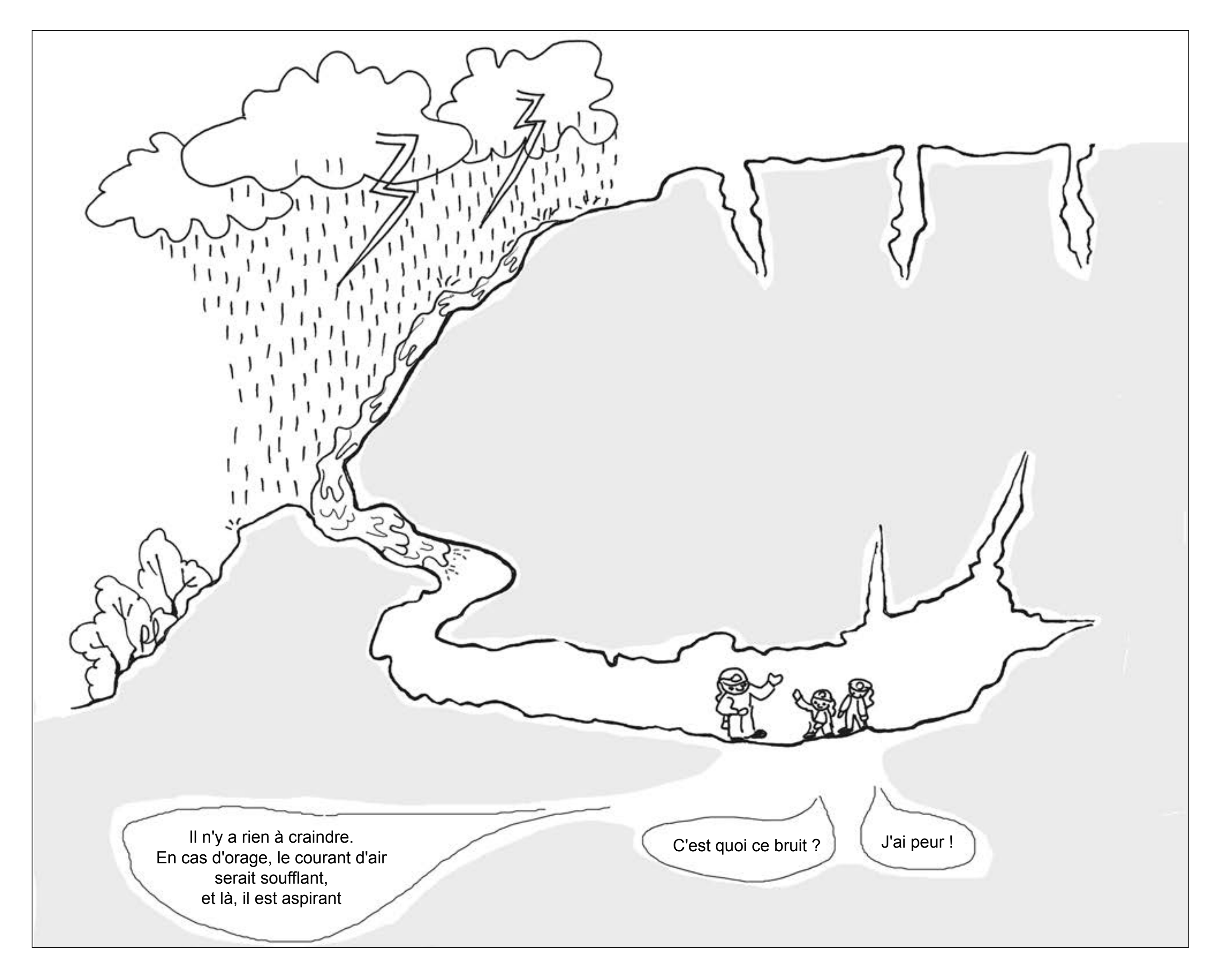


Fig. 2-2- La connaissance n'est pas tout, le bons sens peut servir aussi !
(dessin de Régine Landry)

Knowledge is not enough, common sense is also useful

A-20- Les infrasons générés par les séismes se traduisent-ils par des courants d'air alternatifs ?

Des capteurs placés dans l'air détectent parfois des infrasons, c'est-à-dire des oscillations de la pression de fréquences inférieures à 10 Hz. Les fréquences les plus basses, peuvent engendrer un courant d'air alternatif à une entrée de cavité, du même type que la respiration de la caverne, mais avec des fréquences très régulières. L'amplitude sera d'autant plus grande que la fréquence sera adaptée à la fréquence propre de la cavité souterraine (cf. question K-4 et résonateur de Helmholtz étudié à la question K-4 et dans le tome 2, § 2.5.6).

A-21- Les marées terrestres engendrent-elles des courants d'air ?

Les marées terrestres soulèvent les roches de quelques dizaines de centimètres deux fois par jour, comme les marées océaniques soulèvent la mer. Les mesures ont montré que l'espace entre les fissures, diaclases coupant les bancs rocheux, peuvent présenter des mouvements relatifs de quelques dixièmes de micromètres (thèse de Philippe Crochet). On en déduit que les volumes d'air peuvent varier et provoquer des courants d'air alternés deux fois par jour. Mais ces faibles courants d'air n'ont jamais été observés semble-t-il. Ce phénomène pourrait être mis en évidence à l'entrée d'une cavité à une seule entrée et de bon volume, et en notant en même temps la pression barométrique. On pourrait peut-être différencier l'effet de la respiration de l'effet de marées en regardant le spectre des variations. On trouverait pour les marées une période de 23 h 56 mn alors qu'elle serait de 24 h pour la pression.

A-22- Qu'est-ce que la convection naturelle ?

On appelle convection naturelle ou convection, un mouvement qui est engendré par l'action de la pesanteur sur des inhomogénéités de masse volumique de l'air. Les différences de masses volumiques se traduisent par une répartition des pressions non hydrostatique, et ces gradients de pression entraînent un mouvement, en général bouclé sur lui-même.

Certains puristes distinguent la convection dont l'origine (de la différence de masse volumique) est thermique et les courants de densité pour lesquels la différence de masse volumique a une origine quelconque.

A-23- Qu'est-ce qu'une cellule convective ?

Une cellule convective est un ensemble constitué d'un fluide qui décrit un mouvement fermé. On peut donc définir une surface extérieure de la cellule. Cette surface n'est pas traversée par le fluide.

A-24- Quelles sont les conditions pour qu'apparaissent des cellules de convection ?

Ces différences de masses volumiques résultent en général de différences de températures. Mais des différences de composition (CO_2, vapeur d'eau) peuvent suffire à amorcer une cellule convective. On verra les conditions précises de démarrage au tome 2 (§ 1.2.8).

A-25- Peut-il y avoir convection naturelle dans une salle de température uniforme ?

Oui, si des différences notables de composition surviennent, par exemple des sources de CO_2 débouchant dans la salle.

A-26- Quel est le débit d'air entraîné par une cascade ?

Ce débit dépend de la configuration et du débit de l'eau, mais peut atteindre plusieurs mètres cubes par seconde. On étudiera en détail cet effet au tome 2, § A.4. Il y a en réalité deux phénomènes.

D'une part, la cascade crée une sorte de tourbillon de recirculation. L'air est entraîné par les gouttes d'eau et s'échappe de l'eau en bas de la cascade en emportant éventuellement des embruns. Cet air est ensuite rebouclé, c'est-à-dire qu'il remonte en haut de la cascade par l'extérieur, pour être de nouveau entraîné par elle.

D'autre part, cet effet d'entraînement induit un gradient de pression motrice qui permet à un courant d'air général de s'instaurer dans la cavité s'il y a deux entrées ou s'il y a une possibilité de bouclage. Un courant d'air peut s'installer sur de grandes distances même dans une cavité à une seule entrée (cf. § 1.8.1).

Dans une cavité en tube à vent, l'effet de la cascade augmente en général le débit d'air en régime estival et le diminue en régime hivernal. En effet le courant d'air estival est plutôt descendant et dans le même sens que celui engendré par la cascade. En revanche, le courant d'air hivernal est plutôt montant, en sens opposé de celui généré par la cascade.

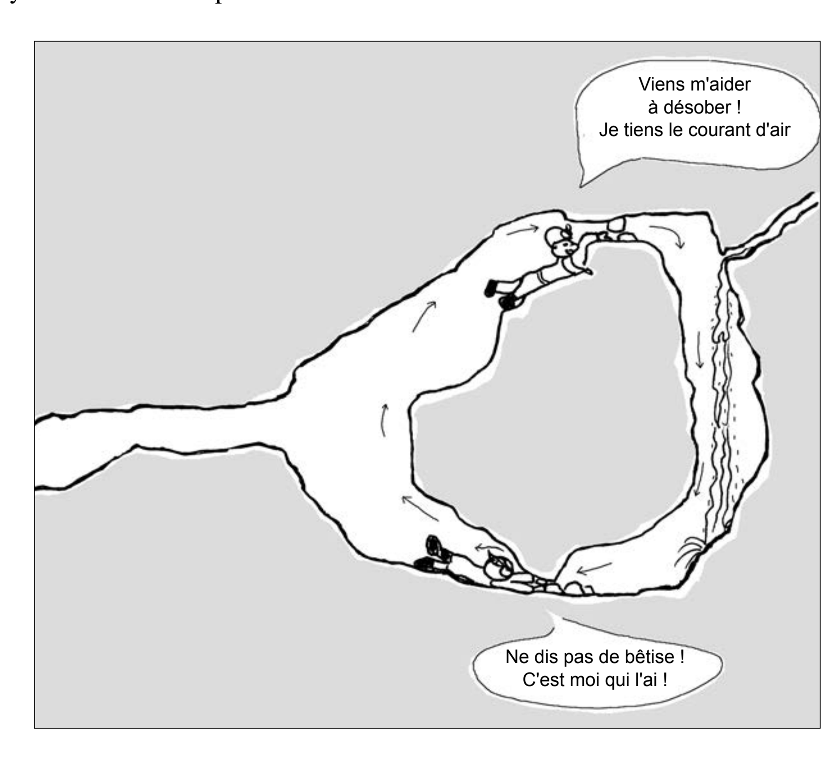


Fig. 2.3- Spéléos à l'œuvre !
(dessin de Régine Landry)
Cavers at work !

A-27- Comment une crue provoque-t-elle l'apparition d'un courant d'air dans une grotte sans courant d'air ?

Il y a deux phénomènes différents. D'une part, une crue est toujours précédée d'une averse. L'eau en descendant dans les fissures du calcaire pousse devant elle un certain volume d'air, ce qui crée un courant d'air soufflant s'il y a une sortie, ou engendre une surpression qui freine la percolation de l'eau s'il n'y en a pas. D'autre part, la crue provoque des mises en charge de l'eau qui repousse ou comprime l'air. Si cet air est relié à l'extérieur par des conduits ou des fissures, ils se mettent alors à souffler. On a déjà vu ce phénomène au § 1.8.5.

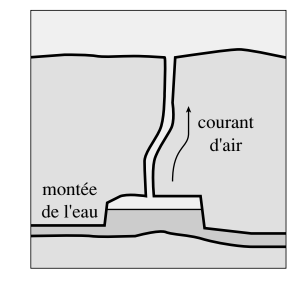


Fig. 2-4- Effet piston de l'eau sur l'air, qui est chassé des réseaux souterrains

Piston effect by flood water

A-28- Quel est le débit d'air engendré par la mise en charge d'un réseau ?

La montée de l'eau s'accompagne d'un reflux de l'air qui a tendance à sortir vers l'extérieur. Dans ce cas, le débit d'air est sensiblement le même que la différence des débits d'entrée et de sortie de l'eau. Mais d'autres mécanismes peuvent exister comme le désamorçage d'un bouchon d'eau.

A-29- Qu'est-ce qu'un courant d'air de recirculation ?

C'est un courant d'air secondaire qui est engendré par un courant principal par l'intermédiaire de la viscosité de l'air (viscosité turbulente => éjection de l'air) ou par un effet partiel de convection thermique.

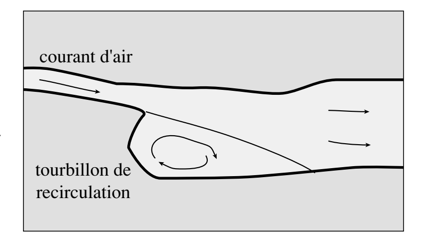


Fig. 2-5- Courant de recirculation

Recirculation eddy

A-30- Qu'est-ce que l'effet de trompe pour un écoulement d'eau ?

L'expression provient d'un dispositif ancien qui permettait d'obtenir des vides partiels avec un simple écoulement d'eau. Le principe est celui de l'effet Venturi. On obtient une pression plus basse au niveau d'un rétrécissement. Si on raccorde le rétrécissement à une conduite, il se produira une aspiration. C'est l'effet de trompe.

On appelle aussi effet de trompe, l'entraînement d'air par une cascade. Cet effet a été utilisé dans d'anciennes mines pour assurer une certaine ventilation des galeries. Cette appellation a été reprise par Félix Trombe (1952). Cet effet est dû à la viscosité turbulente associée aux gouttes formées par la cascade.

A-31- Connaît-on des exemples de courants d'air générés par un effet Venturi ?

On pourrait imaginer qu'un courant d'air en entraîne un autre par effet Venturi. En effet, la pression étant plus petite au droit du rétrécissement, une branche secondaire raccordée à cet endroit pourrait voir un effet d'aspiration. Ce serait possible avec un bon courant d'air. Bien que le phénomène puisse exister, il est difficile à mettre en évidence, sauf sur une boucle fermée.

A-32- Qu'est-ce-qu'un aéro-éjecteur ?

C'est l'entraînement d'un air, normalement au repos, par un air en mouvement. Ce phénomène est très général. Le moindre jet d'air (courant d'air à la sortie d'un resserrement) engendre un débit entraîné qu'on appelle aussi éjecté. Ainsi le débit d'air à la sortie d'un jet augmente-t-il. Au resserrement suivant, le débit en surplus est recirculé et revient au point de départ. Cf. aussi § 1.5.9 et la question I-26.

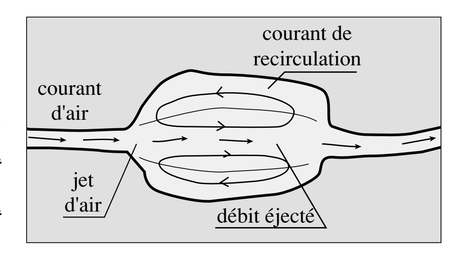


Fig. 2-6- Effet d'éjection d'un jet d'air

Ejection effect (air dragged along) by air-jet

B- Description des courants d’air

B-1- Pourquoi les trous souffleurs sont-ils plus nombreux que les trous aspirateurs ?

Le spéléo qui prospecte pour trouver de nouveaux trous est à l’affût du courant d’air. Certaines fissures intéressantes, mais de dimensions modestes, sont trahies par la présence d’un fort courant d’air. En général, il est soufflant. Et le spéléo qui ratisse des zones où il cherche des courants d’air aspirants, revient souvent bredouille.

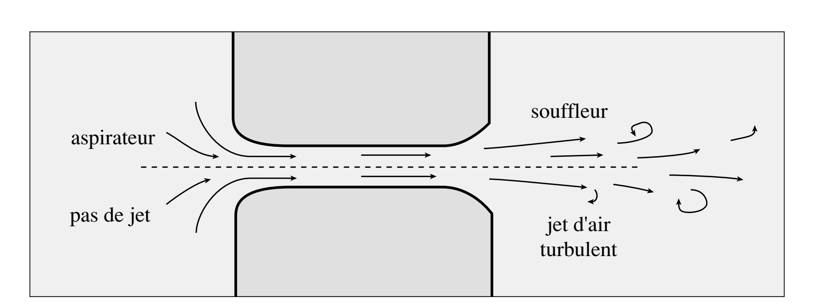


Fig. 2-7- Dissymétrie de l’écoulement entre l’amont et l’aval d’un resserrement

Broken symetry (by temporal inversion) in an upstream and downstream flow

On constate qu’un courant d’air aspirant est quasiment impossible à trouver depuis l’extérieur. Bien sûr, si on a trouvé une cavité pénétrable, au bout de quelques mètres, on pourra en se retournant détecter un courant d’air aspirant car l’air vous soufflera sur le visage. Mais les entrées sont souvent à agrandir et cette façon de procéder sera souvent impraticable.

La difficulté tient à deux raisons :

- D’une part, un courant d’air qui est aspiré dans une fissure présente une structure très différente de celle d’un courant d’air soufflant. Les forces en présence dans une aspiration sont un gradient de pression, alors que le jet soufflant est principalement inertiel (le freinage s’effectuant par mélange turbulent avec l’air ambiant). Côté aspiration, les vitesses décroissent très vite avec la distance, ce qui fait que l’aspiration est insensible à faible distance. Côté soufflage, le jet se maintient sur une bien plus grande distance.

- D’autre part, et c’est peut-être le plus important. Le visage ou la main sont plus sensibles aux différences thermiques qu’à la vitesse du courant d’air. Un courant d’air aspirant a par définition la même température que l’air extérieur, alors que la courant d’air soufflant estival est nettement plus froid. Même un courant d’air de débit insignifiant est détecté s’il est soufflant.

Cela suffit à expliquer la différence entre le nombre des trous baptisés Souffleur et des trous baptisés Aspirateur. On trouvera dans l'ouvrage de J.-Y. Bigot (2000) toutes sortes d'appellations pour les trous qui soufflent ou qui fument.

B-2- À quel endroit, le long d’un tube à vent, trouvera-t-on la vitesse la plus élevée ?

Si le tube à vent ne présente pas de ramifications, on trouvera la vitesse la plus élevée à l’endroit le plus étroit. Si la cavité présente des ramifications, ce ne sera plus le cas.

B-3- À quel endroit, dans la section d’une galerie, le courant d’air est-il le plus fort ?

Les parois exercent sur le courant d’air des forces de frottement qui le ralentissent. C’est donc aux points les plus éloignés des parois que l’on trouve les vitesses les plus fortes. Ce résultat n’est plus vrai juste après des virages serrés, à l’issue desquels le courant d’air est animé de mouvements tourbillonnaires.

B-4- Pourquoi certains courants d’air s’inversent-ils suivant les saisons ?

Le sens du courant d’air dans un tube à vent résulte de l’effet cheminée. L’hiver, l’air de la grotte est plus chaud que l’extérieur. Le courant d’air entre par l’entrée basse et sort par l’entrée supérieure. L’été, c’est l’inverse.

B-5- En combien de temps un courant d'air peut-il s'inverser ?

À l'intersaison, les températures intérieures et extérieures sont très voisines. Les courants d'air d'un tube à vent s'inversent alors très vite et quelquefois, une oscillation peut se produire. Le temps est de quelques secondes. On a vu un exemple au § 1.2.3 et on étudiera ce phénomène dans le tome 2, § 2.5.4.

B-6- Qu'appelle-t-on régime estival ou hivernal pour le courant d'air d'un tube à vent ?

La direction de l'air est différente en été et en hiver. On dira que le régime est hivernal quand la direction est celle qu'on observe normalement en hiver et réciproquement. On pourra donc observer un régime hivernal en été s'il fait froid.

B-7- Comment expliquer des trous soufflants toute l'année ?

Le tube à vent est à deux entrées. Son fonctionnement est simple. Mais des systèmes à entrées multiples existent et leur fonctionnement est plus compliqué. Si l'émission du trou soufflant n'est pas dû à une production continue de gaz (dans les régions volcaniques), il traduit sûrement l'existence d'une circulation d'air à 3 entrées ou plus. Il s'agit alors d'une entrée intermédiaire.

B-8- Une entrée peut-elle être aspirante toute l'année ?

De même, un trou aspirant toute l'année traduit une entrée intermédiaire d'un réseau à 3 entrées ou plus.

B-9- Quel est le courant d'air dans un réseau parallèle à une pente, en communication avec la surface ?

Cette question est traitée dans le tome 2, § 2.3.4. On peut résumer la réponse en disant que le courant d'air est soit aspirant soit soufflant, voire même nul. En présence d'une entrée de ce type, on pourra sous-estimer l'intérêt du trou. Ce qui permettra de suspecter cette situation de trou intermédiaire est l'existence de courants d'air facilement alternatifs au gré du vent extérieur. Le trou semble avoir un courant d'air pulsant.

B-10- Comment se distribuent les courants d'air dans un réseau à multiples galeries ?

Les courants d'air se répartissent entre les différents conduits de sorte que les pertes de charges soient les mêmes pour tous les itinéraires. Et comme les pertes de charges dépendent des débits, les galeries les plus étroites seront parcourues par les courants d'air de plus faibles débits. Dans un réseau à multiples entrées, le problème est en général difficile (cf. tome 2, § 3.6).

B-11- À quelle différence de pression correspond une dénivellation donnée ?

La pression diminue quand l'altitude augmente d'environ 1000 Pa par 100 m (soit 1/100 de bar pour 100 m).

B-12- Écart de pression pour une différence des températures intérieure - extérieure et une hauteur données ?

Deux colonnes de températures différentes ne pèsent pas le même poids. Pour 10 °C d'écart, la différence relative des pressions au bas d'une colonne de 100 m est d'environ 3 %, soit en valeur absolue 30 Pa.

B-13- Quelles sortes de vitesses d'air rencontre-t-on sous terre ?

Des petites et des grandes. Plus souvent des petites que des grandes. Les courants d'air des cavités de montagne atteignent couramment 1 m/s dans les resserrements, alors qu'un courant d'air de plaine de 10 cm/s est jugé très intéressant. Signalons l'Ouragan à la Dent de Crolles avec un courant d'air pouvant atteindre 10 m/s. Dans les grandes galeries, même dans des trous parcourus par un fort débit, le courant d'air est difficile à sentir. Les courants d'air les plus violents sont ceux engendrés par les cascades (10 m/s ou plus) ou par les fortes crues.

B-14- En tube à vent, quelle est la vitesse mesurable dans l'étroiture la plus sévère ?

La vitesse qui s'établit est celle qui assure l'égalité entre la différence de pression disponible (30 Pa pour 100 m de dénivellation et 10°C d'écart de température) et la perte de charge $0{,}5\ \rho\ V^2$, soit une vitesse de 8 m/s pour une dénivellation de 100 m et une différence de température de 10°C (la masse volumique ρ valant à peu près 1,2 kg/m^3). Si les autres pertes de charge sont négligeables (une seule étroiture sérieuse), c'est la vitesse qu'on mesurera effectivement dans cette étroiture.

Si la galerie présente un rétrécissement bien progressif et lisse, on pourrait mesurer des vitesses un peu plus grandes que celles calculées au-dessus. Ce dispositif, appelé Venturi, cause une perte de charge un peu inférieure à 0,5 ρ V^2.

B-15- Qu'est-ce qui limite la vitesse du vent dans un tube à vent ?

Dans un réseau dont on vient d'ouvrir la porte de fermeture, on dispose d'une différence de pression (calculée au-dessus). Cette différence se répartit très vite tout le long des galeries en constituant ce qu'on appelle un gradient de pression motrice. C'est ce gradient qui va accélérer l'air. La vitesse va augmenter jusqu'à atteindre une valeur telle que la somme des pertes de charge est égale à la différence de pression dont disposait l'air. Le régime permanent correspond à l'égalité en chaque point du conduit entre les termes moteurs et les termes résistants (comme d'habitude en physique).

B-16- Quel est le profil des vitesses dans une section de galerie ?

La répartition transversale (dit profil transversal des vitesses) n'est simple que si la galerie est assez rectiligne (sinon il y a décollement, tourbillon et recirculation). Elle sera encore plus simple si la section d'observation succède à une diminution de la section (convergent). Dans ce cas, la vitesse moyenne est assez uniforme dans toute la section sauf au voisinage des parois où les frottements visqueux freinent les couches fluides voisines des parois (couches limites). (exemples dans Choppy, 1985).

B-17- Quels phénomènes se produisent aux virages des galeries ?

Il se produit des tourbillons secondaires qui peuvent induire en erreur un observateur peu attentif. Ce dernier peut alors se tromper sur le sens du courant d'air !

B-18- Qu'appelle-t-on décollement pour un courant d'air ?

Le courant d'air se décolle de la paroi quand un tourbillon prend naissance au niveau de la paroi. Cet effet est lié aux forces d'inertie sur l'écoulement qui a tendance à aller tout droit. Localement, le sens du courant d'air est inversé, d'où des erreurs grossières possibles pour un observateur peu attentif.

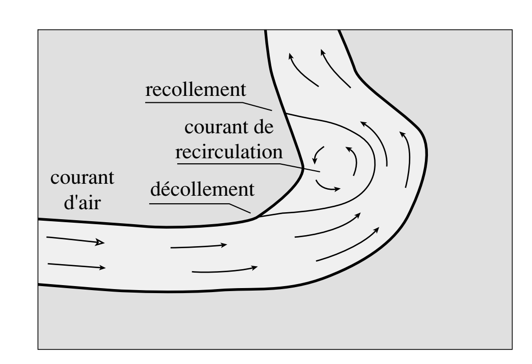


Fig. 2-8- Décollement de la couche limite et tourbillon secondaire dans un virage

Boundary-layer detachment in a bend, and secondary eddy

B-19- Un courant d'air soufflant est-il toujours associé à un courant d'air aspirant de débit égal ?

Dans un tube à vent, cela devrait être le cas. Mais pour une cavité de grand volume respirant sous l'action des variations de la pression extérieure, le bilan n'est pas équilibré car le régime d'écoulement n'est pas permanent mais transitoire.

On a déjà vu qu'il est difficile de trouver les trous aspirateurs, de sorte que le bilan fait dans une cavité réelle, n'est presque jamais équilibré à cause de notre ignorance des trous aspirateurs. Les débits sortants sont en général supérieurs aux débits entrants (cf. § 1.3.3).

B-20- À quelle vitesse une augmentation ou une diminution de pression se propage-t-elle dans un gouffre ?

Une variation de pression se transmet dans un volume donné à la vitesse du son (334 m/s à 5°C). Mais si plusieurs volumes sont connectés par des rétrécissements, il faudra que l'écoulement se transmette de salle en salle pour que l'information progresse. On montre que les vitesses, plus faibles que celle du son, sont tout de même importantes. Une expérience a été faite au Trou qui Souffle de Méaudre dans le Vercors. On bouchait une des entrées et on mesurait à 2 km de là l'influence sur l'autre entrée. La vitesse mesurée est de l'ordre de 100 m/s (cf. tome 2, § 2.5.3).

B-21- Un courant d'air peut-il couler comme de l'eau ?

L'eau coule parce que la masse volumique de ce fluide est plus grande que la masse volumique de l'air et parce que les deux fluides ne sont pas miscibles.

De même si une masse d'air est plus dense que l'air environnant, elle peut se mettre à couler sur une pente (cf. § 1.5.1). Mais, à la différence de l'eau dans l'air, l'air est miscible dans l'air. Pendant le mouvement, les deux masses d'air ont tendance à se mélanger (diffusion turbulente dans la zone dite de mélange) et le mouvement s'arrête car l'air plus dense cesse bientôt de l'être à force de se diluer. Ces écoulements sont appelés courant de gravité ou de densité. Un film montrant un courant de gravité donnera l'impression d'être projeté au ralenti car la pesanteur est affectée d'un coefficient nettement plus petit que 1 (cf. question suivante).

B-22- Quel est l'ordre de grandeur de la vitesse d'une cellule convective (connaissant les températures) ?

C'est le nombre de Grasshof qui permet de trouver l'ordre de grandeur de la vitesse. Cette vitesse s'écrit (pour de l'air considéré comme un gaz parfait) :

$$U \approx \sqrt{2 g L \frac{\Delta T}{T}}$$

On voit que cette vitesse augmente quand la hauteur de la salle L augmente, elle augmente aussi quand la différence des températures ΔT augmente, T est exprimée en K, $g = 9,81$ m/s^2 est l'accélération de la pesanteur. Cette formule est analogue à la formule de Torricelli qui donne la vitesse de l'eau pour une mise en charge L donnée. Le coefficient $\Delta T/T$ (plus petit que 1) apparaît comme un coefficient réducteur de la pesanteur.

B-23- Qu'est-ce qu'un courant de gravité ou courant de densité ?

Un courant de gravité est un écoulement dû à la pesanteur, c'est-à-dire un écoulement d'un fluide plus dense au sein d'un fluide moins dense. Par exemple l'eau salée dans de l'eau douce, l'air + neige dans l'air (avalanche), l'air plus dense dans de l'air moins dense. Une masse d'air peut être plus dense qu'une autre pour plusieurs raisons, par exemple une température plus basse, une quantité de vapeur d'eau plus petite, une concentration en dioxyde de carbone plus grande … On remarque que les écoulements dans les pièges à air froid sont des courants de densité alors qu'on les appelle en général courants de convection.

B-24- Qu'est-ce qu'un piège à air froid, à air chaud ?

Un piège à air froid est, en général, une cavité à une seule entrée en relation avec l'extérieur par une galerie descendante. L'hiver, l'air froid descend par gravité dans la cavité, l'été, l'air froid est piégé et ne peut pas facilement s'échapper. D'où le nom. Un piège à air chaud est une cavité à une entrée reliée à l'extérieur par un conduit ascendant. Jacques Choppy (1985) a proposé d'appeler piège thermique les pièges à air froid ou à air chaud.

B-25- En quelle saison, un piège thermique est-il parcouru par un courant d'air (période ouverte) ?

Le piège à air froid est une cavité descendante. L'été, l'air froid reste au fond et il y a très peu d'échanges. En revanche l'hiver, l'air extérieur, quand il est plus froid que l'air de la cavité, l'envahit et la réalimente en air froid (qui s'échauffera progressivement par rayonnement, infiltration d'eau ou conduction thermique dans la roche). Le courant d'air convectif s'amorcera l'hiver.

Ce raisonnement est simple mais il ne traduit pas totalement la complexité du phénomène. On verra plus loin qu'une atmosphère est localement instable (avec mouvement) si la température décroît plus vite avec l'altitude que l'atmosphère adiabatique de référence. C'est donc le gradient adiabatique de la température qui gère le phénomène. Une différence de composition entre l'air intérieur et l'air extérieur peut compliquer encore l'analyse (cf. tome 2 § 1.2.8).

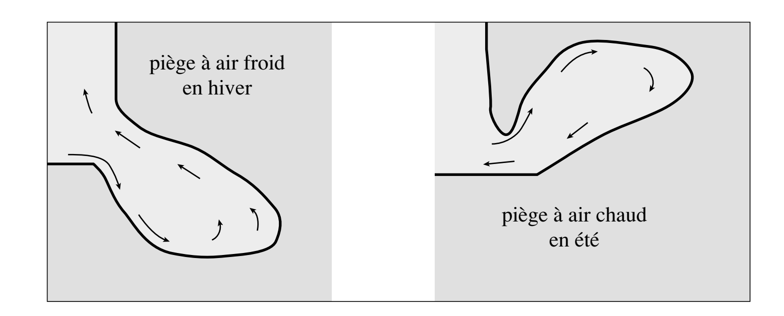


Fig. 2-9- Les deux sortes de pièges thermiques

The two thermic air traps

De la même façon, un piège à air chaud est une cavité remontante. Elle sera parcourue par un courant d'air seulement en été. L'hiver, l'air reste immobile.

B-26- Comment être sûr qu'une cavité est un piège thermique ?

Pour vérifier qu'une cavité est un piège à air froid et pas un tube à vent, il faut la voir parcourue l'hiver par une circulation convective et venir vérifier en été que le courant d'air est nul. Plusieurs vérifications sont conseillées. De même pour un piège à air chaud.

B-27- Existe-t-il des pièges thermiques dans un tube à vent ?

Une galerie borgne montante, reliée à un tube à vent près de son entrée supérieure se comportera comme un piège à air chaud. De la même façon, une galerie borgne descendante près de l'entrée inférieure d'un tube à vent, sera analogue à un piège à air froid. On voit que, dans les deux cas, les pièges thermiques sont situés près des entrées et qu'ils sont un peu contre nature car près d'une entrée inférieure, on a rarement une galerie descendante et réciproquement près d'une entrée supérieure, on n'a guère de galeries montantes.

B-28- Les pièges à air froid et les pièges à air chaud ont-ils des fonctionnements symétriques

Examinons d'abord les échanges en chaleur sensible (liés à la température). Dans un piège à air froid en hiver, l'air froid qui pénètre dans la cavité se réchauffe alors que l'air chaud qui pénètre dans un piège à air chaud pendant l'été, se refroidit au contact de la paroi. Les deux phénomènes sont presque parfaitement symétriques. Examinons maintenant les transferts en chaleur latente (évaporation et condensation). L'air froid qui pénètre en hiver évapore l'eau des parois, mais seulement s'il y en a, alors qu'en été l'air chaud qui se refroidit au contact des parois provoque de la condensation si la température de la paroi est inférieure à la température de rosée de l'air extérieur.

On voit que la symétrie n'est plus parfaite car d'autres conditions apparaissent : circulation ou non d'eau près de l'entrée et degré d'humidité de l'air extérieur. Comme le poste énergétique de la chaleur latente est plus important que l'autre, on ne pourra pas utiliser directement les résultats d'un piège à air froid pour les transposer à un piège à air chaud.

B-29- Pourquoi certains courants d'air restent-ils cantonnés au voisinage du sol des galeries ?

Si un courant d'air ne remplit pas une galerie mais reste près du sol, c'est que ce courant d'air est plus froid que l'air de la galerie. Il apparaît ce qu'on appelle une stratification de l'air. Ce phénomène s'apparente aux courants de gravité. Il faut que les vitesses n'excèdent pas une valeur limite au-delà de laquelle l'entraînement turbulent homogénéiserait tout l'air de la galerie.

B-30- Pourquoi trouve-t-on des courants d'air de sens différents au sol et au plafond ?

Si les sens des courants d'air sont inversés entre le plancher et le plafond, on a affaire, soit à une convection si les débits sont les mêmes en haut et en bas (débit total algébrique nul), soit à un courant de recirculation si les débits sont différents (débit total algébrique non nul, cf. question B-18)

B-31- Qu'appelle-t-on stratification ?

La stratification est la disposition dans laquelle les couches d'air les plus denses sont en bas et les moins denses en haut. L'autre configuration étant instable ne saurait subsister.

B-32- Quelles sont les causes de stratification d'un courant d'air ?

Il y a deux types : la stratification thermique, dans laquelle les couches chaudes sont en haut et les couches froides sont en bas, et la stratification de composition, pour laquelle ce sont les différences de composition de l'air qui jouent le rôle. Par exemple un air chargé de dioxyde de carbone aura tendance à couler en bas, alors qu'un air chargé d'humidité (moins dense) aura tendance à s'écouler au plafond des galeries. On trouvera des compléments à la question K-22.



C- Courants d’air et recherche de première en spéléo

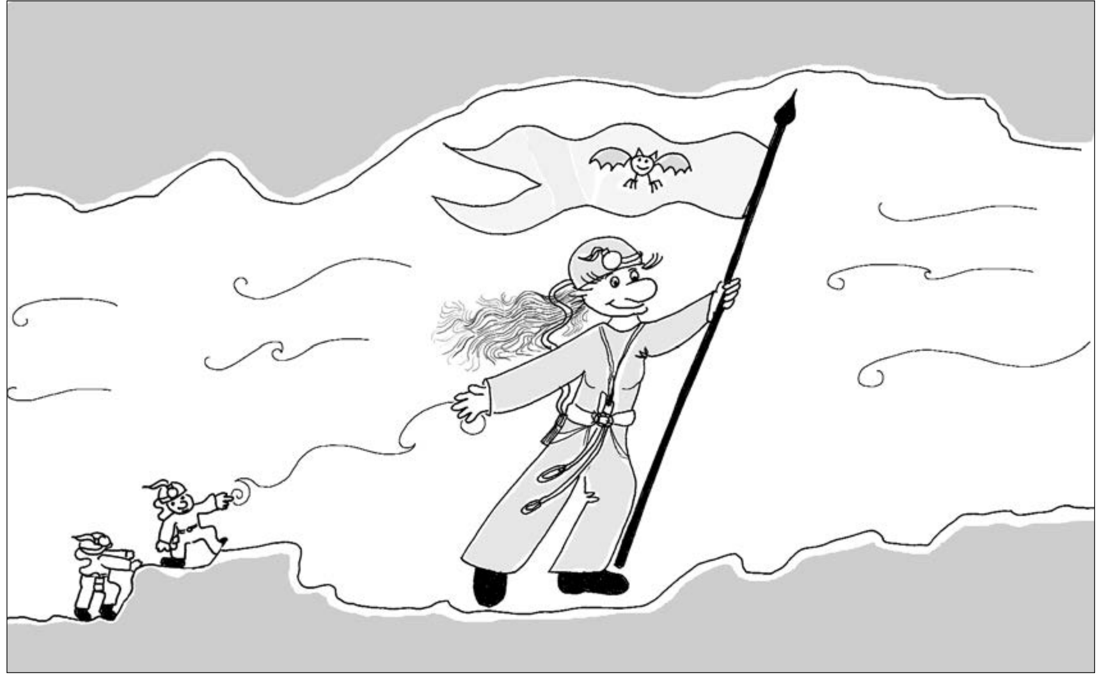


Fig. 2-10- Le courant d’air, tel une Jeanne d’Arc des abîmes, désigne l’objectif aux conquérants des ténèbres
(dessin de Régine Landry)

The current of air is like an underground Jeanne d’Arc, indicating the direction for underground conquerrors

C-1- À quoi sert l’observation des courants d’air ?

Elle sert à encourager les spéléos dans leur recherche de la suite d’un réseau. On a envie de renvoyer à la jolie et amusante citation de Pierre Venesque mise en exergue par Jacques Choppy dans son fascicule sur la dynamique de l’air (1986) : «Le courant d’air est au spéléo ce que le réverbère est à l’ivrogne : ça le soutient plus que ça ne l’éclaire».

Elle sert aussi à mieux comprendre une cavité puisqu’elle oblige le spéléo à envisager le karst dans sa globalité.

C-2- Comment le courant d’air peut-il guider le spéléo dans ses explorations ?

Tous les spéléos expérimentés qui recherchent de nouveaux réseaux savent bien que le meilleur guide reste le courant d’air. L’explorateur qui cherche la suite d’un réseau à courant d’air, se contente de lever le nez pour suivre ce fameux courant d’air. Dans un réseau sans courant d’air, la recherche d’une suite est beaucoup plus fastidieuse et aléatoire.

Dans les cavités des plaines ou des plateaux, les courants d’air sont souvent insignifiants. Mais à l’arrivée d’un orage, ils peuvent devenir aussi forts que ceux des montagnes. On en déduit qu’il sera toujours intéressant d’aller à l’entrée d’une grotte qu’on soupçonne être intéressante à l’arrivée d’un orage. Gare à la crue tout de même ! C’est ainsi qu’une sortie spéléo avortée pour risque de crue peut être à l’origine d’une belle observation (cf. § 1.8.6).

C-3- Dans la recherche d’une jonction entre deux cavités, comment observer les courants d’air ?

Si les cavités ne sont pas très éloignées l’une de l’autre, la vérification que le courant d’air de l’une correspond (en sens et en débit) au courant d’air de l’autre est un très bon indice. S’il n’y a pas de courant d’air, la jonction entre les deux réseaux est en général problématique. Pas de guide pour les désobstructions, pas de dynamitages possibles à cause des gaz.

C-4- Pourquoi les courants d'air constituent la clé des traversées spéléos ?

Une traversée se différencie d'une simple jonction en ce sens qu'une des entrée est plus élevée que l'autre et que dans le parcours de l'une à l'autre, on rencontre des puits en général descendants. À titre personnel, si je me suis tellement intéressé aux courants d'air, c'est parce que je suis un amateur de traversées, de traversées à trouver.

Dans cette recherche de jonction, le problème du courant d'air est central. En général, on connaît l'entrée basse, par exemple une résurgence ou une grande grotte et cette entrée basse laisse sortir un important courant d'air froid l'été. L'inversion de ce courant d'air avec les saisons démontre qu'il s'agit d'un tube à vent et il existe donc une ou plusieurs entrées à trouver sur la montagne ou le plateau au-dessus de la grotte.

La recherche de ces entrées est du domaine de la prospection et pour chaque type de région, il existe de bonnes méthodes de prospection et nous ne nous appesantirons pas dessus.



Fig. 2-11- Le courant d'air est le guide du spéléo
(dessin de Régine Landry)

The air current is the cavers guide

Une fois un gouffre trouvé, on se pose la question de savoir s'il constitue «l'entrée supérieure» du réseau. Si le courant d'air est aspirant et violent, pas de problème, on tient le «bon bout» et il n'y a plus qu'à essayer de suivre le courant d'air avec tout l'arsenal des techniques spéléos et la ténacité, voire l'acharnement, habituels aux spéléos.

Si le courant d'air est faible, il ne faut pas se hâter d'abandonner le trou, car on verra dans le tome 2 (§ 2.3.4 et 3.6) qu'un trou intermédiaire, c'est-à-dire situé entre une entrée basse et une entrée plus haute, peut avoir un courant d'air nul, ou faible dans un sens ou dans un autre.

Le critère est plutôt le suivant : si le courant d'air est faible mais avec des fluctuations rapides et importantes suivant les nuages, le vent, alors le trou est peut être très intéressant, et il ne faut pas le dédaigner. Si le courant d'air est régulier mais très faible pour une dénivellation de plusieurs centaines de mètres, alors on peut craindre des obstacles sans fin et il ne faut pas s'acharner.

C-5- Comment repérer en prospection un trou souffleur, un trou aspirateur ?

On a vu qu'il est beaucoup plus facile de détecter un trou souffleur qu'un trou aspirateur. Il faut donc choisir la saison pour laquelle le trou recherché souffle. Si c'est un point haut, c'est l'hiver qu'il faudra prospecter, si c'est un point bas, c'est l'été. Si on n'a aucune idée, on cherchera indifféremment les trous souffleurs et les trous aspirateurs.

En hiver, un souffleur exhale de l'air plus chaud en général que l'air ambiant. La main suffira souvent pour sentir la différence de température. Un thermomètre sera bien utile pour confirmer la première impression. Un trou souffleur l'été offrira par comparaison un courant d'air glacé et le prospecteur en short sentira la caresse froide sur ses mollets. Là encore, un thermomètre sera utile pour comparer la température de l'air avec celle des réseaux profonds voisins (on pourra appliquer la relation de Choppy pour évaluer cette température, tome 2, § 4.2.2).

Pour trouver un trou aspirateur, la fumée de cigarette ou l'encens pourront rendre des services dans les fissures impénétrables. En été, dans un trou pénétrable, une température anormalement élevée fera suspecter un courant d'air aspirant. En hiver, la présence de glace sur une certaine distance dans une galerie horizontale conduira à la même conclusion.

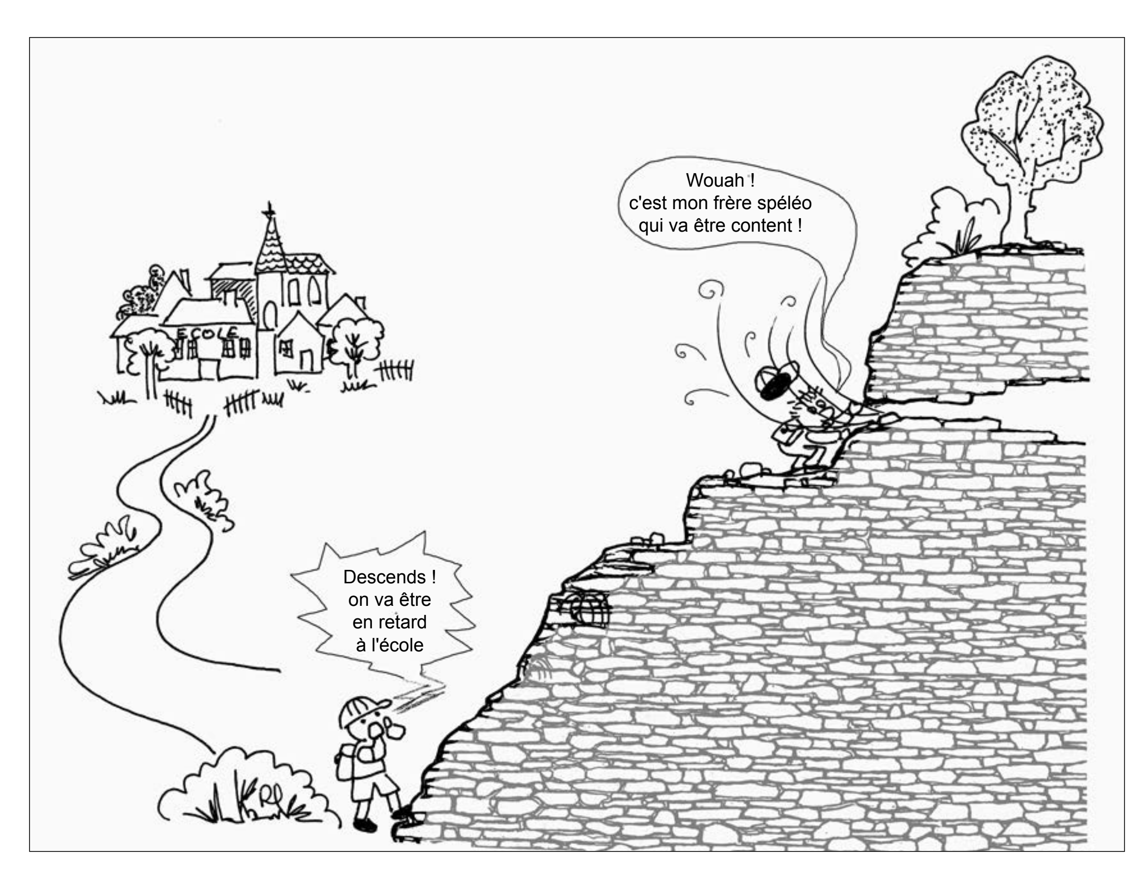


Fig. 2-12- L'éole buissonnière
(d'après un bon mot du site internet Festivent de Calvi, dessin de Régine Landry)
Prospecting or studying ?

C-6- A-t-on intérêt à prospecter les jours de crue ? (sur une idée de Robert Thérond)

On signale de loin en loin la découverte de trous qui se mettent à souffler uniquement au moment des crues.

Plusieurs explications sont possibles :

- Le courant d'air d'origine thermique est barré par des siphons sur l'itinéraire de sortie. En revanche, les jours de forte crues, les pressions atteintes sont suffisantes pour désamorcer le siphon et l'air piégé dans la cavité peut s'échapper violemment.
- La percolation de l'eau à travers les fissures met l'air de la cavité sous pression.
- La montée de l'eau chasse l'air au-dessus.

On voit qu'une prospection ces jours-là permettrait de repérer des trous habituellement sans courant d'air, mais connectés néanmoins avec le réseau profond (cf. § 1.8.6)

C-7- Comment se présentent les courants d'air ?

À l'extérieur, le vent présente de multiples variantes indépendamment de sa température. Il peut être continu et régulier ou bien il peut présenter de l'intermittence avec des alternances de rafales et d'accalmies. Dans les cavités, on trouve ces deux sortes de vent mais avec une prédominance des vents réguliers. Les rafales sont plutôt cantonnées au voisinage des entrées et sont liées au vent extérieur. Dans les zones profondes des cavités, le courant d'air est souvent léger et régulier. Aux changements de direction des galeries, il se produit des tourbillons.

La propriété essentielle qu'il faut toujours avoir en tête est que le débit (en mètre cube par seconde) se conserve dans une galerie si ses parois sont étanches. Cela se traduit, dans le cas d'une diminution de la taille de la galerie, par une augmentation de la vitesse du courant d'air. Plus précisément, la vitesse varie comme l'inverse de la section transversale.

On est très sensible au courant d'air par l'intermédiaire de la peau du visage ou des mains, mais la plus grande sensibilité sera obtenue par l'examen du cheminement du souffle, c'est-à-dire le petit nuage fourni par l'haleine se refroidissant dans l'air saturé de la cavité. Dans les grottes chaudes ou trop sèches, la fumée de cigarette ou d'encens peut faire l'affaire. Mais on prendra garde de détecter les courants d'air dans les parties horizontales des galeries pour éviter de confondre la montée normale de l'air exhalé, qui est chaud, avec un courant d'air ascendant (cf. § 3.1.2).

Dans les étroitures, le courant d'air peut devenir violent. Si on écoute attentivement, on entend le bruit que les tourbillons turbulents produisent. L'apparition du bruit est la preuve de la force du courant d'air (cf. question C-21).

C-8- Quelle poudre utiliser pour visualiser un courant d'air ?

En plus des fumées, comme celles de la cigarette ou l'encens auxquelles on peut reprocher d'être chaudes et donc d'amorcer un courant d'air par elles-mêmes, les perfectionnistes pourront se procurer auprès de la société Jaeger un dispositif pour engendrer des particules très fines d'eau (poudre de lycopode).

C-9- Comment être sûr de la présence d'un courant d'air dans une galerie ?

Si le courant d'air est violent, il est facile de le sentir sur le visage.

Si le courant d'air est faible ou bien si la galerie est vaste, on utilise un marqueur pour visualiser le courant d'air et en apprécier la direction. Dans les trous pas trop chauds, le marqueur sera le souffle qu'on exhale, car il est plus chaud que l'air extérieur et presque saturé en vapeur d'eau. Le refroidissement provoque un léger brouillard et il suffit dans la majorité des galeries horizontales pour détecter le sens du courant d'air. On prendra garde d'attendre que les remous d'air provoqués par la marche se soient atténués avant de faire l'observation (10 s). Si on ne peut pas former de buée, on peut utiliser la fumée d'une cigarette ou d'un bâtonnet d'encens.

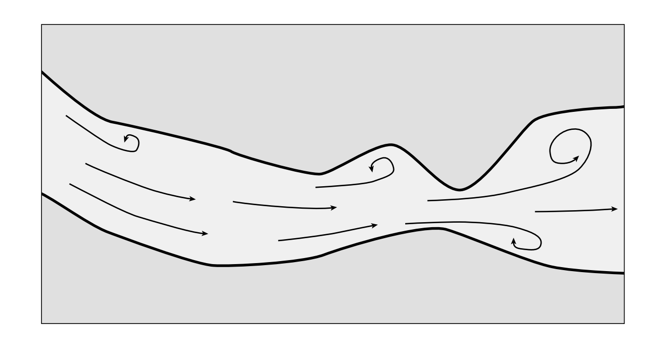


Fig. 2-13- Le meilleur endroit pour mesurer un courant d'air

The best place for measuring air flow is at the narrowest point

Il n'est pas toujours possible de se mettre sur un tronçon horizontal, mais on peut dire qu'un courant d'air faible détecté dans un conduit non horizontal est *a priori* douteux s'il est montant.

C-10- Quels sont les endroits à éviter pour vérifier l'existence d'un courant d'air ?

Plafonds inclinés, cheminées remontante ou descendante. Ces sites conduisent à des erreurs fréquentes, il faut opérer par comparaison et être très prudent sur les conclusions.

En pratique, on se souviendra que la chaleur du corps amorce un léger courant d'air ascendant, que le souffle est légèrement plus léger au moins au début, que l'air ambiant, et qu'on aura donc beaucoup plus souvent tendance à détecter un courant montant (à tort) qu'un descendant.

La flamme de l'acétylène et la chaleur du corps suffisent à amorcer une petite cellule de convection. Répétons une nouvelle fois qu'un courant d'air faible ne sera jamais sûrement détecté, que s'il a été vu dans une galerie horizontale plusieurs secondes après l'arrêt de tout mouvement dans le voisinage.

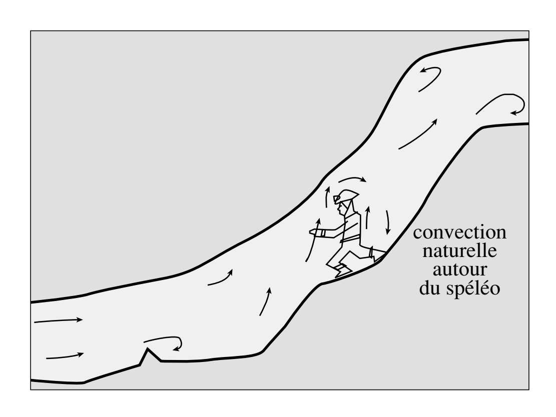


Fig. 2-14- Il ne faut pas chercher un courant d'air dans une pente

Do not search for an air flow in an inclined passage

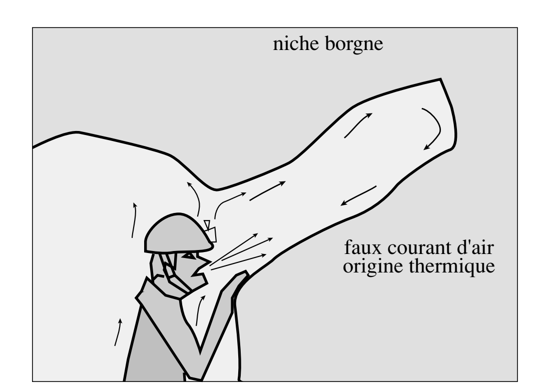


Fig. 2-15- Courant d'air induit par le spéléo

The air flow is induced by caver himself

C-11- Comment sentir le courant d'air à l'entrée d'une trémie ?

Un autre genre de difficulté est le courant d'air qui se perd dans une trémie de blocs. Si la trémie est un peu grande, il est très difficile de savoir où le courant d'air s'échappe, surtout si toute le trémie absorbe. Des essais peuvent néanmoins être faits avec de la fumée de cigarette ou d'encens.

Le spéléo brûle de l'encens et regarde où part la fumée. Si le courant d'air est faible ou la galerie importante, il faut deux opérateurs. Le spéléo n° 1 brûle de l'encens et au bout d'un moment, le spéléo n° 2 descend du sommet de la trémie et note à quel niveau il sent la fumée. Ce sera sans doute au voisinage du point d'absorption.

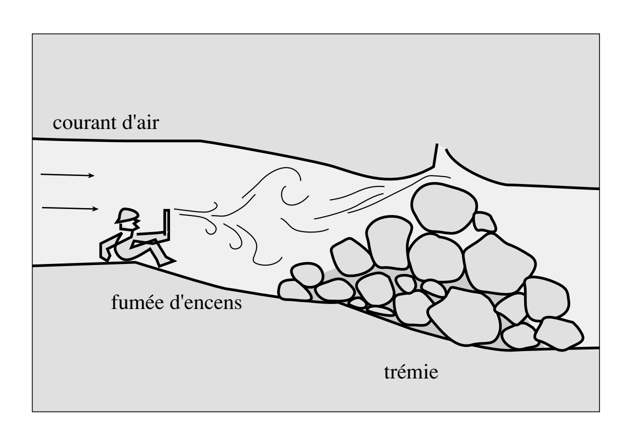


Fig. 2-16- Détection du point d'absorption
du courant d'air à l'aide de fumée d'encens

*Detecting an absorption point
in a collapsed gallery
with incense smoke*

C-12- A-t-on intérêt, pour l'exploration, à mesurer les vitesses et le débit des courants d'air ?

Beaucoup de spéléos pensent qu'il est impossible de mesurer le débit d'un courant d'air sans instrument et que de toute façon cela n'a pas d'intérêt. On trouvera les diverses façons de mesurer un débit au § 3.1.9. Montrons l'utilité de cette mesure pour l'exploration.

Le spéléo qui suit une galerie nouvelle reste par la force des choses collé au plancher. Il arrive souvent que la suite du réseau soit située en hauteur. La meilleure façon de localiser la position du départ est de détecter à quel endroit le courant d'air est nettement atténué. Il faut pour cela évaluer le débit total dans la galerie et faire cette opération à différents endroits.

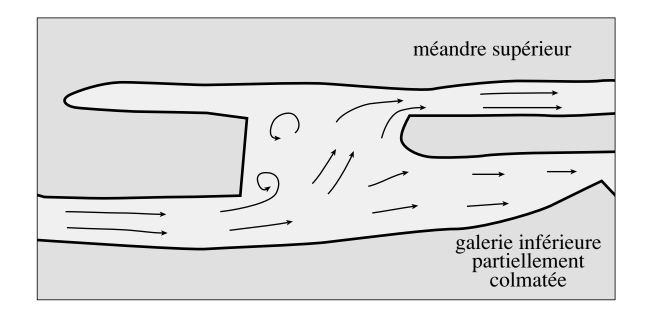


Fig. 2-17- Le courant d'air
comme indicateur de suite occulte

Air flow is a good guide for discoveries



Fig. 2-18- L'affreux Jojo des cavernes, toujours prêt à tromper le spéléo

Le joyeux spéléo, naïf et à l'affût du courant d'air

(dessin de Régine Landry)

The cave genies, always fool the artless caver with uncomprehensible air flows

L'exemple que nous donnons sur la figure 2-17 de la page précédente est inspiré de l'exploration par le SC Rodez de la cueva del Valle en Cantabrie (renseignement Éric Boyer). Souvent dans les galeries en forme de méandre, il n'est pas possible depuis le bas de voir, même avec un phare, les départs en hauteur et seul le courant d'air permet de faire l'escalade qui va «payer».

C-13- Comment savoir si un courant d'air est celui d'un tube à vent ou d'une respiration de la caverne ?

C'est la multiplication des observations qui permettra de conclure. Un tube à vent possède en général un courant d'air changeant suivant les saisons. Mais l'entrée intermédiaire d'un réseau à trois entrées peut présenter un caractère trompeur. Une respiration de la caverne ne survient qu'au changement de la pression atmosphérique. La surveillance de l'altimètre (altitude qui monte = pression qui descend) permettra de savoir s'il y a une corrélation entre le courant d'air et les variations de la pression (cf. aussi la question A-8).

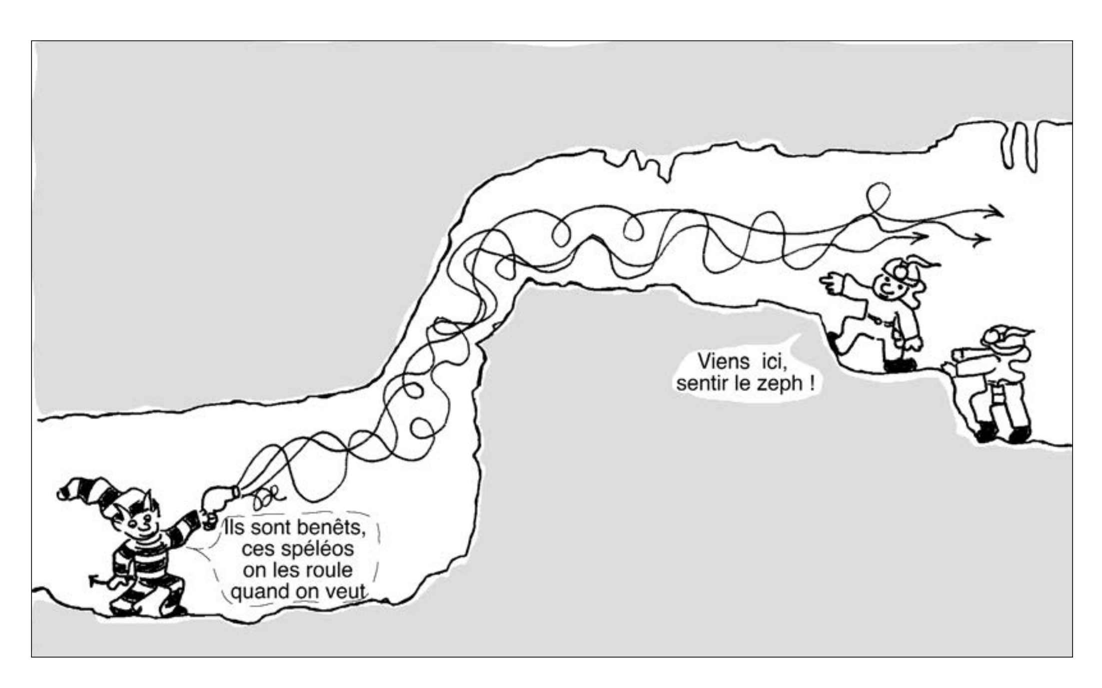


Fig. 2-19- Certains courants d'air restent inexplicables !
(dessin Régine Landry)

Some air flows are unexplained

C-14- À partir de quelle vitesse, un courant d'air peut-il être jugé intéressant ?

Tout dépend de la région et du style de courant d'air. Une cavité à une seule entrée qui respire possédera en général un faible courant d'air. Si le caractère de respiration est établi, ce courant d'air même faible sera un excellent indice. Dans certaines régions des Cantabriques, des courants d'air inférieurs à 100 l/s ne sont pas très intéressants. Dans d'autres régions, au sol recouvert de sédiments non karstifiés, on sera beaucoup moins difficile : 10 l/s seront très appréciés. Il faut, bien sûr, faire intervenir la possibilité que le trou soit une entrée intermédiaire, ou que la température ne se prête pas au courant d'air. Dans ce dernier cas, il faut revenir à une époque plus propice.

C-15- Comment déterminer la dénivellation des deux entrées d'un réseau à courant d'air ?

Si le réseau est un tube à vent à deux entrées dont on connaît la dénivellation, il est possible de déduire la vitesse de l'air dans l'étroiture la plus sévère du réseau (cf. question B-14). Réciproquement, une mesure de la vitesse dans un resserrement sévère, permet d'estimer la dénivellation minimale entre l'entrée connue et l'entrée inconnue. Malheureusement, la dénivellation réelle peut être beaucoup plus grande s'il y a d'autres étroitures, et la recherche n'en est guère facilitée.

C-16- Quels sont les débits de courant d'air qu'on peut rencontrer sous terre ?

Les débits d'air sont très variables. Par exemple le Trou Souffleur de Saint Christol dans le Vaucluse souffle un débit de l'ordre de 100 l/s. Le Trou qui Souffle de Méaudre en Isère souffle lui 2000 l/s. Mais on rencontre des phénomènes, des monstres ! Le Guiers Mort, la grotte de la Diau ou le Mort Ru soufflent jusqu'à 10 m^3/s (10 000 l/s). En Espagne, la Cañuela souffle jusqu'à 40 m^3/s. À un certain endroit de la Cañuela appelé «étroiture» le courant d'air souffle les lampes à acétylène. Pourtant l'étroiture en question fait 10 m de large et près de 1,7 m de haut !

C-17- Pourquoi une galerie devient-elle impénétrable ?

La galerie peut être bouchée par un effondrement de la voûte (trémie) ou bien remblayée par un dépôt de galets, de sable, de limon ou d'argile. Une autre cause peut être un changement dans la forme de la galerie qui, par exemple, de circulaire peut devenir très plate (laminoir ou diaclase) et impénétrable tout en gardant une section constante. Il peut aussi y avoir un changement de section dû à une modification de la qualité de la roche. Ainsi les galeries dans l'Hauterivien sont-elles plus grandes que celles dans l'Urgonien. De même, les modalités du creusement ont pu changer tout au long de la cavité. C'est particulièrement vrai dans le cas des méandres à banquettes à contre-pente.

C-18- Une trémie est-elle un gros obstacle pour un courant d'air ?

Une trémie, pour les spéléos, est un amoncellement de blocs issus de l'effondrement de la voûte en général et qui obstrue plus ou moins une galerie.

Une trémie n'est pas un gros obstacle pour le courant d'air si les blocs sont de tailles plus que décimétriques et s'ils ne sont pas enrobés d'argile ou de sable. La présence d'un courant d'air dans une trémie est un bon indice mais ce n'est pas l'assurance que l'ouverture sera facile. L'espace entre les blocs est petit mais la surface totale de passage peut être finalement assez grande et le courant d'air n'a pas de difficulté à passer. Les trémies à blocs enchâssés dans l'argile sont des obstacles redoutables pour le courant d'air et pour le spéléo.

C-19- Quel rapport entre une désobstruction et un courant d'air ?

Les spéléos qui entament des désobstructions le font pour plusieurs raisons. En surface, la topographie ou un repérage magnétique ont montré qu'une galerie passait à proximité de la surface ou d'un trou connu. La jonction se fait à l'aide d'un tunnel. Il n'y a pas alors de courant d'air pour guider le spéléo. Certaines désobstructions sont entreprises parce que la galerie n'a aucune raison de s'arrêter sur l'obstacle qui arrête le spéléo. C'est la foi dans la suite qui motive le spéléo.

Mais dans le cas le plus fréquent, la désobstruction est commencée car il y a un sérieux indice de continuation de la cavité. Cet indice peut être un bruit d'eau, une perte d'un cours d'eau. Mais c'est le plus souvent le courant d'air. Dans ce cas, son intensité, sa température sont des éléments à prendre en compte. Si le courant d'air est violent dans l'étroiture (ronflement), alors il n'y a pas à hésiter, une suite intéressante se trouve derrière le resserrement. Si le courant d'air est très faible et régulier, c'est bien sûr moins intéressant. Mais peut-être que la dénivellation entre les entrées est très petite, ou bien plus probablement, il y a de nombreuses étroitures. Cela n'empêche pas de creuser ...

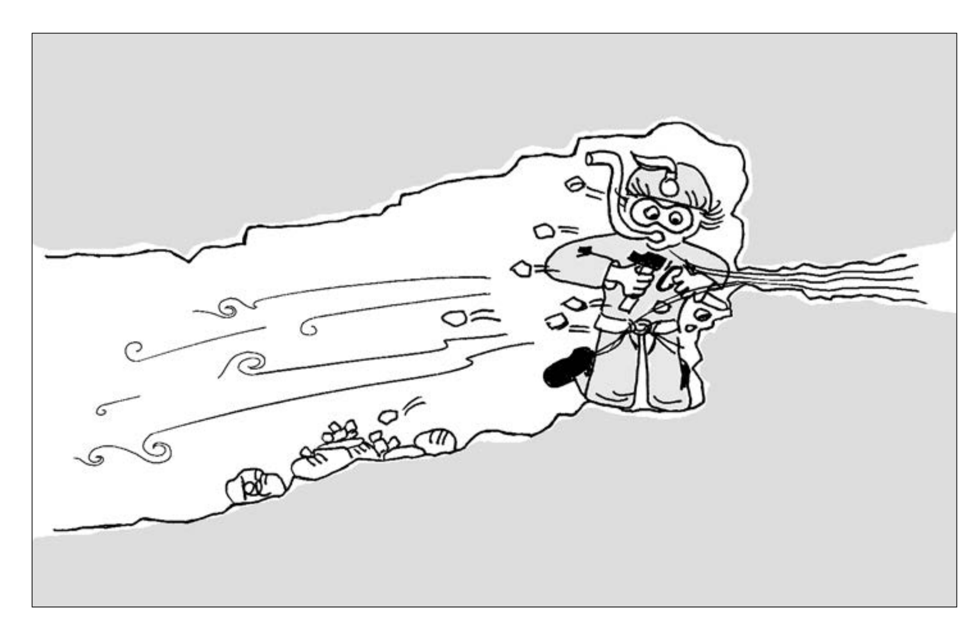


Fig. 2-20- La première, c'est souvent ingrat à obtenir, mais quand il y a le courant d'air, il y a la motivation

(dessin de Régine Landry)

Discoveries are ofen difficult to obtain, but where is a will, there is a way !

Pour utiliser les explosifs, il faut bien sûr qu'il y ait du courant d'air... Ne jamais entreprendre des chantiers à l'explosif sans expérience ou sans se faire aider par des spéléos compétents du secteur !

Si, au cours d'une désobstruction, le débit du courant d'air augmente au fur et à mesure que l'orifice s'agrandit, cela signifie que l'étroiture que l'on élargit contribue d'une façon significative à la perte de charge totale du réseau. En général, le débit se stabilise à partir d'une certaine section de l'étroiture en chantier, cela signifie que des resserrements plus loin sont plus petits que celui qu'on a ouvert.

C-20- Quelle est la cause du bruit d'un courant d'air ?

Un écoulement lent est laminaire, c'est-à-dire à filets parallèles et réguliers. À vitesse plus grande, l'écoulement est instable, des tourbillons prennent naissance, alimentés en énergie par le mouvement moyen. Ces tourbillons sont relativement organisés, ils engendrent des fluctuations temporelles de pression à différentes fréquences qui se traduisent par un bruit.

C-21- Y a t'il une relation entre le bruit et la vitesse d'un courant d'air ?

On montre que la puissance acoustique émise par un jet augmente comme la vitesse du jet à la puissance 8. Qu'on se souvienne d'un jet de réacteur d'avion ! Comme les mesures de puissance acoustique se font en décibel, c'est-à-dire à l'aide du logarithme de la puissance acoustique, le bruit en décibel est, à une constante près, égal à 8 fois la vitesse.
On peut donc classer, vis-à-vis du bruit, les courants d'air en trois groupes :

- courant d'air silencieux
- courant d'air induisant un bruissement au niveau de l'oreille
- courant d'air produisant un bruit perceptible à distance : un bruissement, un ronflement, un grondement, un sifflement de locomotive …

Mais des études seraient à entreprendre sur ce sujet, en particulier pour trouver la fonction reliant le bruit (en décibel) et la vitesse. Cette fonction dépend probablement de la taille du conduit et des rugosités de la paroi (cf. aussi le tome 2, § 1.3.10).

C-22- Comment prévoir le sens d'un courant d'air dans un réseau avec des étages connectés à la surface ?

Dans un réseau complexe, le courant d'air suivra en gros le fonctionnement des tubes à vent avec un régime hivernal et un régime estival. Mais seule, une bonne connaissance du réseau permettrait de prévoir dans quel sens le courant d'air soufflerait dans telle partie intermédiaire. Par exemple, à la Dent de Crolles, le trou du Glaz souffle en été comme l'entrée basse du Guiers Mort car le secteur du Labyrinthe et du réseau Sanguin au voisinage du point bas occasionne la plus grande perte de charge du réseau.

D- Spéléo et courant d'air

D-1- Comment trouver la sortie d'un courant d'air ?

Quand un courant d'air aspirant parcourt un réseau, il sert de guide. Mais il arrive plus ou moins vite, des obstacles qui freinent ou stoppent l'exploration : trémie, méandre trop étroit, laminoir à vider partiellement de son remplissage. Il est alors tentant de trouver «l'autre côté». C'est-à-dire le trou souffleur qui correspond à l'aspirateur. Le problème est le même pour un courant d'air dans l'autre sens.

C'est en général très difficile. Il faut se limiter à la recherche d'un courant d'air soufflant, donc choisir sa saison. La présence de neige facilitera les opérations. L'exemple du Trou qui Souffle montre que même une cinquantaine de sorties de prospection en hiver n'ont pas permis de trouver l'origine du fameux courant d'air (l'entrée du Toboggan des Naïades ne représente qu'un petit débit, cf. § 1.12.2 et § 3.2.2.e).

Si la sortie du courant d'air est localisée, les chances restent intactes. En revanche, si le courant d'air se répartit en une multitude de petites sorties, leur découverte est hasardeuse. Prenons l'exemple de Gournier en Vercors avec un courant d'air qui peut dépasser le m^3/s. Des dizaines, voire des centaines de journées de prospection n'ont pas encore permis de trouver le débouché en surface.

D-2- Quelles seraient les applications du traçage d'un courant d'air ?

Dans le traçage d'un torrent souterrain, les sorties potentielles sont en général toutes connues du fait de l'existence d'un torrent qui succède à la source, et le problème est simplement de les départager. Pour le courant d'air, la situation est moins facile, et il ne faut pas espérer trouver les entrées inconnues des réseaux en colorant les courants d'air. En revanche, on pourra confirmer ou infirmer une liaison hypothétique entre deux trous connus. On pourra aussi déterminer la vitesse moyenne dans de grands réseaux permettant le calcul des volumes traversés. L'étude de l'évolution de la dispersivité tout au long des galeries fournira des renseignements sur la géométrie des conduits, quand les études théoriques seront plus avancées sur ce sujet ! On reverra le problème au § 3.3.5.

D-3- Comment utiliser un altimètre sous terre ?

L'altimètre est un appareil qui mesure la pression de l'air et traduit cette pression en altitude puisque la pression diminue *grosso modo* avec l'altitude. Malheureusement la pression atmosphérique en un point varie aussi dans le temps. Un altimètre ne peut mesurer, en fait, que la dénivellation entre un point d'altitude connue (calage de l'altimètre) et un point d'altitude inconnue. Pour passer d'une différence de pression à une différence d'altitude, il faut connaître les variations de la température avec l'altitude. Les altimètres utilisent en général l'Atmosphère Standard de l'Aviation Civile qui donne une diminution de 0,5 °C pour 100 m environ (cf tome 2, § 1.2.4).

Sous terre, on a intérêt à commencer par équilibrer la température de l'altimètre avec celle du trou. Si le trou a une température sensiblement constante, il faudra faire une correction (voir question D-5).

D-4- Un altimètre est-il utilisable lorsque la cavité est parcourue par un courant d'air ?

Lorsqu'une cavité est parcourue par un courant d'air du type tube à vent, le courant d'air permet à l'air intérieur de se rapprocher, quant aux pressions, de l'air extérieur. Si les pertes de charge sont réparties régulièrement en fonction de l'altitude, on pourra considérer que la pression, c'est-à-dire l'altitude lue dans la cavité, est la même que celle qu'on lirait à l'extérieur. Et si l'atmosphère extérieure présente une décroissance de sa température de 0,5 °C par cent mètres de dénivellation, il n'y aura pas de corrections à effectuer sur la lecture de l'altimètre.

D-5- Quelles corrections doit-on apporter à la mesure de profondeur avec un altimètre ?

Un altimètre est étalonné à partir de la relation retenue par l'aviation civile, et cette relation correspond à peu près au gradient adiabatique humide. Heureusement, il est peu différent du gradient que l'on observe dans les gouffres. On pourra donc le plus souvent ne pas faire de correction. On trouvera des exemples de correction dans le tome 2 § 1-2-5.

D-6- Un air peut-il être toxique ?

Oui, s'il contient des gaz toxiques H_2S, CO, NH_3 , s'il présente un déficit d'oxygène ou possède trop de dioxyde de carbone (gaz carbonique). Les gaz issus du fonctionnement d'un perforateur thermique (Ryobi) contiennent du CO (monoxyde de carbone) et autres gaz toxiques. Les gaz provenant d'un dynamitage contiennent des composés nitrés et du CO. En principe, l'existence d'un courant d'air permet à l'air toxique de redevenir respirable par dilution.

L'incident lors d'un l'entraînement de secours à l'aven Despeysse montre que la combustion de l'acétylène conduit, peut-être, à une production de CO (à confirmer). Francis Guichard (1987) raconte qu'il a rencontré de l'ammoniac dans le gouffre du Verteil-Sud en Dordogne. Le gouffre était totalement irrespirable (syncope…), ce gaz provenait vraisemblablement d'une bergerie située au voisinage. De même, Philippe Renault (1982-1, p. 92) discute l'accident survenu à deux plongeurs spéléos émergeant d'un court siphon dans la galerie artificielle de Cadrieu (Lot). Il pense que la cause de l'accident n'est pas une grande teneur en CO_2, mais plutôt la présence de H_2S, dû à la décomposition du minerai.

D-7- Quel est le seuil de toxicité des principaux gaz dangereux ?

En reprenant les règles en usage dans les mines françaises (polycopié sur l'aérage des mines de l'École des Mines de Paris), on peut donner quelques seuils :

Oxygène (O_2) quantité normale 21 %
limite inférieure réglementaire 19 %
trouble légers à 18%
mort rapide à 10%
le gaz est consommé par les oxydations et combustions.

Dioxyde de carbone (CO_2) quantité dans l'atmosphère 350 ppm (= $3{,}5.10^{-4}$ bar = 0,035 %)
limite supérieure réglementaire 12500 ppm (0,0125 bar = 1,25 %)
troubles légers à partir de 50000 ppm (= 5%)
mort rapide à 100 000 ppm (10 %)
produit par l'oxydation, la respiration et les combustions

Monoxyde de carbone (CO) absent de l'atmosphère
limite réglementaire : 50 ppm
troubles par syncope : 100 ppm
mort rapide : 10 000 ppm
produit par les explosifs ou certaines combustions

Hydrogène sulfuré (H_2S) absent de l'atmosphère
limite supérieure réglementaire : 20 ppm
trouble par conjonctivite à 50 ppm
mort rapide : 500 ppm
produit par certaines fermentations ou apporté par certaines eaux

Monoxyde d'azote (NO) absent de l'atmosphère
limite réglementaire : 10 ppm
toux à 60 ppm
mort rapide à 700 ppm
produit par les moteurs thermiques et les explosifs

Ammoniac (NH_3) absent de l'atmosphère
valeur limite d'exposition 15 mn (ministère du travail) 50 ppm
valeur létale 7600 ppm
produit par la décomposition de certaines matières organiques

D 8- Comment peut-il se produire un déficit d'oxygène ?

La teneur en oxygène peut diminuer dans l'atmosphère de trois manières :

- On ajoute un gaz étranger à l'air (par exemple injection de dioxyde de carbone d'origine profonde), la teneur en oxygène diminuera. Mais il faut beaucoup de gaz ajouté pour diminuer significativement la teneur en oxygène. Ainsi il faudrait une injection de 16 % de dioxyde de carbone pour diminuer la teneur d'oxygène à 18 %. Ce phénomène est une simple dilution.
- Un corps présent dans la galerie adsorbe l'oxygène de l'air. Ce cas ne doit guère arriver sous terre.

- Une combustion ou une oxydation utilise l'oxygène de l'air et le transforme en dioxyde de carbone. La réaction consomme une mole d'oxygène pour une mole produite de dioxyde de carbone. Par exemple une teneur de 2% de dioxyde de carbone s'accompagnera d'une diminution de la teneur d'oxygène à la valeur de 19 %. C'est le processus le plus efficace.

D-9- Peut-on contrôler la teneur en oxygène par l'extinction de la flamme acétylène ?

La lampe à carbure s'éteint quand la teneur en oxygène descend au-dessous de 13 %. Cette teneur est presque mortelle pour l'homme. L'extinction de la lampe à carbure survient trop tard et ne peut être prise comme repère. En revanche, les bougies (stéarine) s'éteignent en-dessous de 16 %. Elles constituent donc un bon indicateur de déplétion d'oxygène.

D-10- Quels appareils trouve-t-on pour mesurer le CO_2 ?

On lira avec profit les articles de Philippe Renault sur le gaz carbonique (1982, 1983). Le dioxyde de carbone, appellation moderne du gaz carbonique, peut se mesurer de différentes manières dont deux sont intéressantes en spéléo.

Appareils à absorption en infrarouge. Le dioxyde de carbone a une bande importante d'absorption en lumière infrarouge. Les capteurs utilisant ce principe sont instantanés mais encore un peu chers. Ces appareils offrent aussi l'avantage d'être indépendants de la température, de l'humidité et de ne présenter aucune interférence avec les autres gaz. Les prix sont élevés, de l'ordre de 1000 € (cf. aussi § 3.1.5).

Compteurs Draeger. Ils consistent en une pompe qui permet de remplir un tube dont le réactif chimique fournit une valeur du CO_2. La mesure est fiable mais un peu coûteuse.

D-11- Quelle est la température maximale pour explorer une cavité ?

Le règlement des mines limite la vitesse d'une courant d'air dans une galerie à 8 m/s. De même, il est interdit de travailler à des températures saturées équivalentes, supérieures à 32 °C.

La température équivalente se calcule par la relation réglementaire suivante : $\theta_{equiv} = 0,3\ \theta_s + 0,7\ \theta_h - V$ (θ_s est la température ordinaire, θ_h est la température humide qui dépend de l'humidité de l'air et qu'on lit sur le diagramme psychrométrique (cf. tome 2, § 1.1.4).

1er exemple : grotte sans courant d'air de température 32°C et de 100 % d'humidité. La température humide vaut aussi 32 °C et la température équivalente vaut 32°C. C'est la limite proposée par les mineurs. Au-delà, il faut ventiler ou refroidir.

2e exemple : grotte sans courant d'air à la température de 40 °C et au taux d'humidité de 30%. Le diagramme psychrométrique fournit une température humide de 26,5 °C, soit une température équivalente de 31,1 °C. Là encore, on est aux limites pour exercer une activité soutenue.

Certaines grottes thermales en France (grotte d'Aix les Bains) ou volcanique à l'étranger peuvent poser des problèmes sérieux à l'explorateur. Ces problèmes doivent être résolus au cas par cas. La prudence étant la règle.

D-12- Peut-on dynamiter dans une galerie sans courant d'air ?

Pour des raisons de sécurité évidentes, il ne faut pas dynamiter dans un réseau sans courant d'air.

Si on a besoin, malgré tout, de dynamiter, il faut injecter, dans les règles de l'art, de l'air frais en un point qui permettra une évacuation complète des gaz (cf. manuel d'exploitation des mines).

On peut citer l'exemple du bas du forage de 300 m de profondeur au Trou qui Souffle de Méaudre où une grosse charge d'explosif a été nécessaire pour rejoindre la galerie naturelle qui avait été ratée de 5 mètres par les foreurs. Il n'y a pas de courant d'air au siphon de Pâques Sud ni au siphon de la Cuspide. Le gouffre a été fermé pendant plusieurs mois. Une visite que j'ai faite au siphon sud, 4 mois plus tard, m'a donné mal à la tête (mais peut-être ai-je été influencé par le fait que je me méfiais du risque).

D-13- Comment dynamiter quand le courant d'air est soufflant ?

Dans un réseau du style tube à vent, le courant d'air change de sens suivant les saisons. Si on veut ouvrir un passage à l'extrémité du réseau, il vaut mieux attendre que le courant d'air soit aspirant. Mais diverses raisons peuvent obliger à faire des tirs avec un courant d'air soufflant (à l'occasion d'un secours par exemple).

Pour le perçage, on renvoie les gaz de la perceuse à essence vers la sortie au moyen d'un tuyau (du style tuyau d'arrosage ou autre) relié à un tube en cuivre soudé sur le pot d'échappement. Et on attend pour sortir que les gaz soient sortis ou dilués. Ou bien, si le tir doit avoir lieu près de l'entrée, on utilise un groupe électrogène et une ligne.

Pour le tir proprement dit, la mise à feu est faite depuis l'extérieur (si le point n'en est pas trop éloigné), ou bien depuis une branche annexe, ou enfin quand il n'y a aucune autre possibilité, on peut penser à utiliser le principe de la niche pressurisée. Mais il faut prendre garde qu'au moment du tir, l'onde de choc ne puisse pas déchirer la tente ou la bâche soudée constituant la niche.

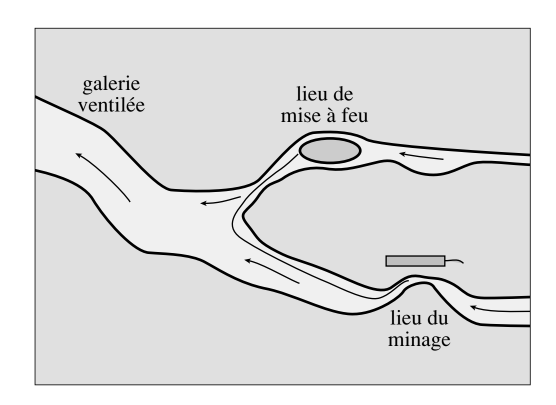


Fig. 2-21- Mise à feu depuis une galerie annexe

Dynamiting from a secondary gallery

En revanche, il ne faut pas utiliser la méthode *kamikaze* de tirer et de se précipiter à travers le nuage pour respirer près des déblais, un courant d'air qu'on espère redevenu frais.

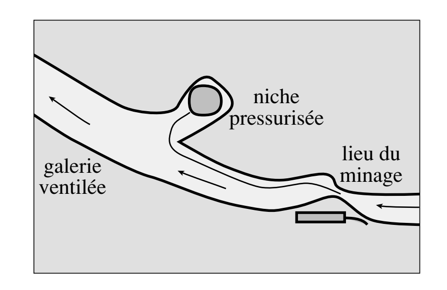


Fig. 2-22- Utilisation d'une niche pressurisée

Pressurised recess is a solution for dynamiting

D-14- Qu'appelle-t-on niche de pressurisation dans la sécurité des mines ?

C'est un abri disposé dans un recoin protégé d'une galerie de mine et pouvant être isolé de la galerie par une porte étanche à l'air. Des réserves d'air sous forme de bouteilles d'air comprimé permettent d'assurer une légère surpression de la niche. En cas d'alerte (incendie par exemple), les mineurs vont se réfugier dans cette niche et attendent la fin de l'alerte.

Le principe peut être facilement appliqué en spéléo, à l'occasion de tirs en bout de galerie avec courant d'air soufflant. Les gaz d'explosion passent dans la galerie pendant que les spéléos attendent que l'air soit redevenu sain. La niche pourra être construite à l'aide d'une bâche en plastique soudé et armé avec des arceaux de tente, ou à la limite, en obturant un recoin de la galerie à l'aide d'une bâche en plastique. Il faut veiller bien sûr à obtenir une assez bonne étanchéité.

Pour calculer le volume de la niche ou le volume d'air amené par une bouteille de plongée, il faut estimer en fonction du débit de courant d'air, le temps qu'il faudra pour que les gaz s'évacuent. Un bon coefficient de sécurité est recommandé. Un biberon de plongée permettra d'assurer facilement une légère surpression de la niche, empêchant les gaz de pénétrer dans la niche. Il faut, bien sûr, tester l'ensemble au cours d'une expérience préalable sans risque.

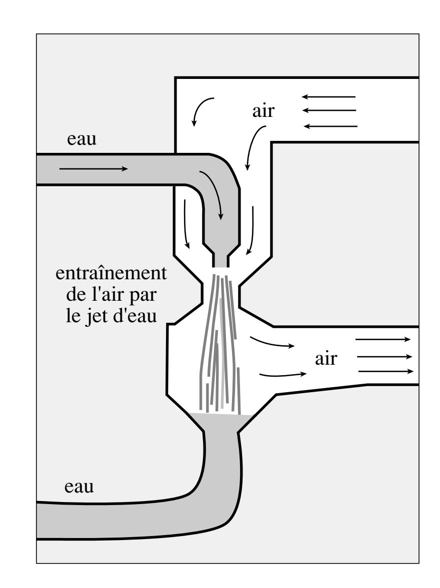


Fig. 2-23- Les trompes à eau pour créer un courant d'air

Water trump to generate an air flow

D-15- Comment les maîtres mineurs pouvaient-ils aérer leurs conduits avant l'invention des ventilateurs ?

On voit dans les livres anciens sur les mines que les mineurs connaissaient parfaitement les courants d'air de convection et la façon d'en augmenter le débit. Les mineurs utilisent le mot aérage plutôt qu'aération. Ce n'est qu'au cours du 20e siècle que le chapitre sur l'aérage naturel des mines devient inexistant dans les traités d'exploitation des mines.

Déflecteur angulaire

A : Madriers principaux – B : Chevilles – C : Traverses – D : Planches verticales – E : Angles – F : Vent – G : Chapeau – H : Puits – I : Dispositif sans chapeau.

Fig. 2-24- Techniques d'aérage de la fin du Moyen Âge (tiré d'Agricola, 1556, fig. 85)

Airing technics in the end of the Middle Ages (Agricola)

Dans le *De Re Metallica* d'Agricola publié en latin en 1556, on trouve d'admirables gravures (dont quelques unes sont reproduites dans cet ouvrage) qui montrent la finesse de la connaissance que les mineurs avaient des manières d'améliorer les courants d'air de leur exploitation.

Une des ces gravures montre l'utilisation d'un paravent pour fournir une surpression sur une des entrées alors qu'un conduit en venturi favorise la sortie de l'air dans le deuxième puits.

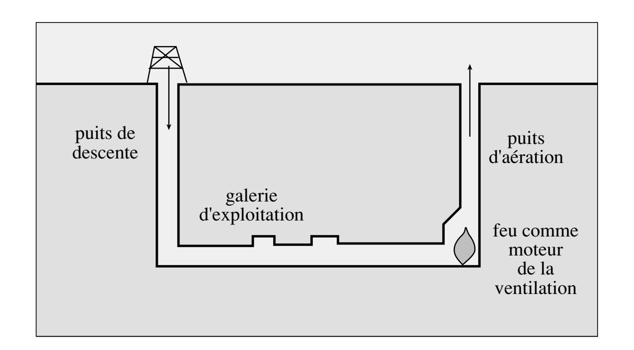


Fig. 2-25- Ventilation artificielle par tirage d'un feu entretenu dans un puits secondaire

Artificial airing with fire in the old english mines

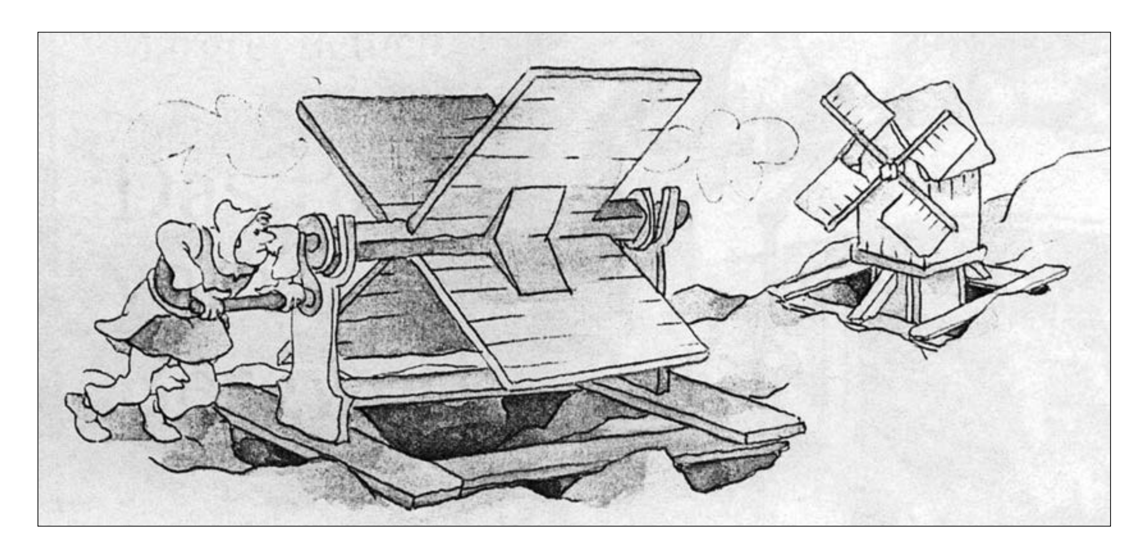


Fig. 2-26- Dessin pour un livre d'enfant (intitulé Bergwerk, à partir du Agricola) représentant deux procédés de ventilation utilisés dans les mines de Bohême à la fin du Moyen Âge

Two processes of mine ventilation at the end of Middle Ages

Mais le travail des fourneaux exigeait de hautes températures (le fer fond à 1500°C) obtenues en ventilant énergiquement le foyer pour augmenter la vitesse de combustion du charbon de bois. Les fondeurs connaissent donc la ventilation artificielle depuis plus de 2500 ans et, au Moyen Âge, le soufflet n'avait pas de secret pour les mineurs. Des installations sophistiquées utilisaient l'énergie humaine, animale, hydraulique ou même éolienne pour l'aérage des mines.

Un procédé qui est évoqué dans les traités anciens est l'utilisation de l'eau tombant en douche dans les puits pour créer une pression motrice. Mais ce procédé qui suppose qu'on remonte l'eau pour assécher la mine est peu rentable (existence de pompes dites d'exhaure). Plus classiquement, de nombreuses études eurent lieu au 17e et 18e siècle pour installer des trompes à eau en extérieur, utilisant l'écoulement de l'eau pour obtenir une charge motrice de l'air et permettre une ventilation.

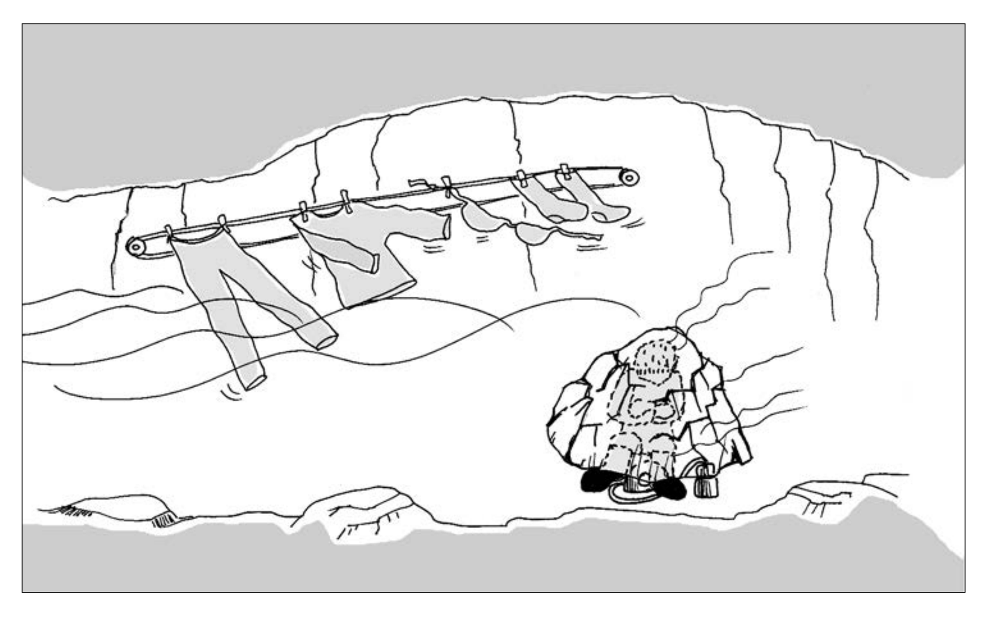


Fig. 2-27- La tortue et le séchage dans le vent
(dessin de Régine Landry)

Tortoise technique and drying in the wind

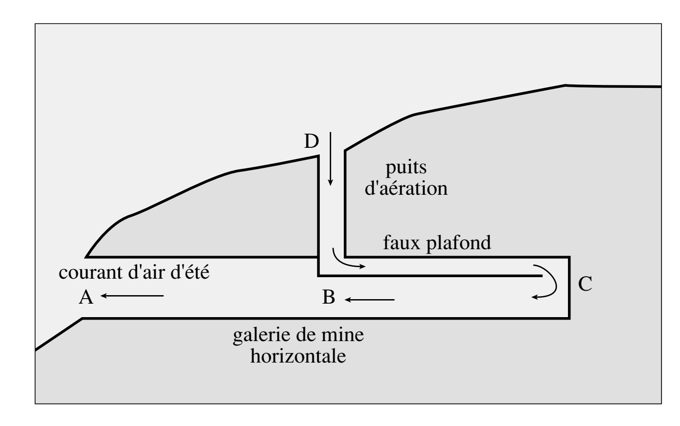


Fig. 2-28- La ventilation naturelle par faux plafond au 16e siècle

Natural ventilation with false ceilings (old mine technical)

Par ailleurs, les mineurs n’hésitaient pas à allumer des feux pour augmenter le tirage dans le puits de sortie (fig. 2-25). Ce procédé fut utilisé longtemps dans les mines de charbon anglaises, dans des régions de plaine empêchant l’aérage naturel. Leur efficacité était telle que les ventilateurs mécaniques eurent du mal à les remplacer (le charbon était gratuit).

Indiquons une technique qui a été utilisée dans les anciennes mines vosgiennes : la technique du faux plafond, qui témoigne d’une belle ingéniosité (Grandemange, 1988 et figure ci-dessus).

La mine est creusée horizontalement pour éviter la formation d’un piège à air chaud ou à air froid qui crée une stratification stable la moitié de l’année et empêche tout renouvellement de l’air.

Une cheminée d’aération est percée, qui amorce une circulation d’air par tube à vent, mais cette circulation ne concerne que le tronçon ABD. Pour aérer les tronçons au-delà du point B, les anciens mineurs avaient eu l’idée de construire un faux plafond de faible section pour ne pas géner le passage mais suffisant pour permettre à l’air de se renouveler au bout de la galerie : le point C.

Cette technique suppose qu’on bouche complètement l’accès à la cheminée d’aération. Cette technique est simple, elle pourrait être mise en œuvre par des spéléos entamant une désobstruction dans une galerie borgne à proximité d’une galerie ventilée. Plutôt qu’un faux plafond, ils pourraient utiliser un tuyau.

D-16- Comment créer artificiellement un courant d’air dans une cavité ?

En ouvrant une nouvelle entrée, en désobstruant une galerie en relation avec une autre entrée, en vidant provisoirement un siphon permettant là aussi une circulation d’air, ou en injectant artificiellement de l’air.

D-17- Quelle quantité de dioxyde de carbone un spéléo produit-il ?

Elle est très variable suivant son activité physique. On retient en général la fourchette de 0,2 à 2,4 l/mn. Un homme inspire en général entre 7 et 60 l/mn d’air. L’air expiré contient environ 4 % de CO_2, (donc présente un pourcentage en oxygène de 17 %). Au repos, un spéléo ne consomme pas beaucoup d’air, mais les conditions de température obligent néanmoins son métabolisme à rester à un certain niveau. On peut adopter 0,5 l/mn de production de CO_2 dans ces conditions, c’est-à-dire une consommation d’oxygène de 0,5 l/mn.

D-18- Combien de temps un spéléo au repos peut-il survivre dans un mètre cube d’air ?

Soit un volume de 1 m^3 d’air à 21 % d’oxygène, le spéléo peut y rester jusqu’à ce que l’oxygène descende à 18 %. Il peut donc consommer 0,03 m^3, c’est-à-dire 30 litres d’oxygène. Il faudra 60 mn pour que le spéléo au repos consomme cette quantité.

On en déduit qu’il faut un mètre cube d’air par spéléo et par heure. La survie d’un spéléo qui aurait à sa disposition seulement 10 m^3 d’air ne pourrait guère excéder 20 à 50 heures s’il n’y a aucun renouvellement de l’air. La mise progressive en hypothermie diminuerait sensiblement le métabolisme et augmenterait l’autonomie. Bien entendu, il faudrait éteindre la lampe à acétylène car elle consomme de l’oxygène.



Soufflet à bras ventilant une galerie

A : Galerie – B : Tuyau – C : Nez du soufflet.

Fig. 2-29- Dessin tiré de Agricola (1556) et publié dans Angel, 1989
montrant l'aérage d'une mine au 15e siècle

Manual blowing-machine after Agricola

Au printemps 2001, le sauvetage par Franck Vasseur de Patrick Mugnier au 6e siphon des Fontanilles après 72 heures passées dans une cloche d'un soixantaine de mètres cubes, a confirmé ces valeurs (Vasseur, Mugnier, 2001).

D-19- Quelles sortes de gaz le carbure produit-il ?

Si le carbure était pur, il ne produirait au contact de l'eau que de l'acétylène. En pratique, le carbure n'est pas tout à fait pur. Il se forme d'autres gaz au contact de l'eau. Parmi ceux-ci, on peut noter l'hydrogène sulfuré, l'ammoniac, la phosphine, l'arsine. Le tableau ci-dessous présente l'analyse publiée par D. Accorsi du laboratoire du Cerchar (bull. du club de la Nuit Minérale de Senlis, 1996, p. 24).

gaz	formule	masse
acétylène	C_2H_2	30 g
hydrogène sulfuré	H_2S	0,1 g
ammoniac	NH_3	0,1 g
phosphine	PH_3	0,01 g
arsine	AsH_3	0,001

Tab.1- Gaz produits par 100 grammes de carbure réagissant sur l'eau

D-20- Quels gaz, la combustion de l'acétylène produit-elle ?

Si le carbure ne produisait que de l'acétylène, la combustion de ce gaz produirait de l'eau et du dioxyde de carbone. La flamme de la lampe à acétylène est blanche parce que la combustion se fait avec déficit d'oxygène. Une partie des atomes de carbone sont libérés sans brûler et ces particules de carbone chauffées par la flamme deviennent blanches. Si l'oxygène était abondant, la flamme serait bleue (comme au démarrage). Le carbone qui a illuminé la flamme en blanc et qui arrive à la périphérie, brûle à son tour et fournit du dioxyde de carbone. Si l'oxygène est vraiment trop déficitaire, la flamme reste rouge car la chaleur de la réaction est insuffisante pour porter les particules de carbone à haute température. La température de la flamme étant trop faible à la périphérie, le carbone ne peut pas brûler correctement, la flamme est fuligineuse, c'est-à-dire qu'elle produit une fumée qui transforme, à la longue, le spéléo en un mineur aux yeux cerclés de noir de fumée !

Les 30 g d'acétylène du tableau de la page précédente, produisent, après combustion, 101,5 g de dioxyde de carbone et 20,8 g d'eau. La combustion consomme 92,3 g d'oxygène. La consommation d'oxygène par l'éclairage à acétylène est un peu inférieure à celle du spéléo lui-même (Darne 2001).

Toxicité. L'acétylène tout seul (Darne 2001) n'est pas irritant, mais peut conduire à haute dose à des maux de tête. On doit limiter la teneur dans l'air à 2500 ppm, soit le 1/10 de la limite inférieure d'explosivité. D'après L'Air Liquide (Département français des gaz communiqué par D. Accorsi), la phosphine (ou hydrogène phosphoré) est un gaz à odeur caractéristique d'ail, celle que l'on sent habituellement, toxique pour 11 ppm (parties par million en volume). La dose limite admissible (Valeur Limite d'Exposition pendant au maximum 15 mn, du ministère du Travail) est de 0,3 ppm (soit 0,4 mg/m^3). De même, l'arsine (hydrogène arsenié) est un gaz toxique qui a pour Valeur Limite d'Exposition 0,2 ppm (soit 0,8 mg/m^3). On voit d'après le tableau précédent que des deux gaz, arsine et phosphine, c'est la phosphine la plus dangereuse. Dans un m^3 d'air, la limite admissible serait atteinte pour 0,4 mg de phosphine, c'est-à-dire 1,2 g d'acétylène soit un peu plus d'un litre d'acétylène dans un mètre cube (soit 1000 ppm). La combustion de la phosphine conduit à des oxydes de phosphore. L'hydrogène sulfuré et l'ammoniac sont comparativement moins gênants.

Quand le spéléo pratique la tortue, c'est-à-dire quand il s'isole sous une couverture de survie pour se protéger du froid, il doit veiller à maintenir allumée la flamme de son éclairage acétylène.

D-21- Comment ventiler une galerie au cours d'un sauvetage ?

Si au cours d'un sauvetage, l'afflux des spéléos sauveteurs dans des réseaux étroits ou contenant déjà du CO_2 crée des problèmes de pollution de l'air, il faut procéder à l'évacuation partielle mais rapide des sauveteurs et ne reprendre le sauvetage qu'après installation d'un ventilateur soufflant de l'air frais dans la zone du sauvetage.

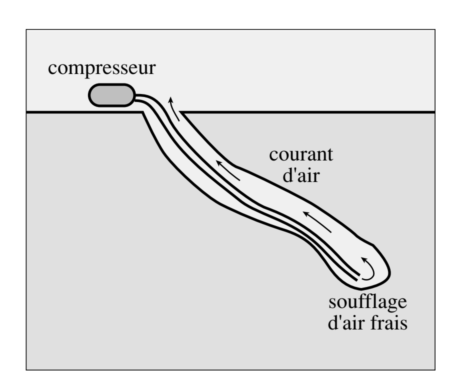


Fig. 2-30- Ventilation forcée par un compresseur situé à l'extérieur

Forced ventilation with an outside compressor

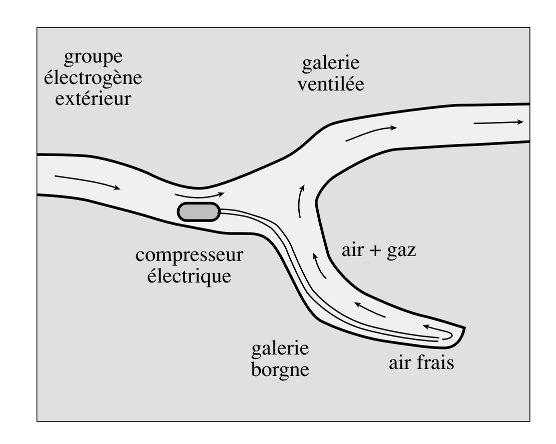


Fig. 2-31- Ventilation forcée par un compresseur électrique situé dans une galerie ventilée

Forced ventilation with an electric compressor in an air-gallery

D-22- Comment ventiler une galerie pour évacuer les gaz de dynamitage ?

Il n'est pas recommandé d'entreprendre des travaux de dynamitage dans une galerie sans courant d'air. Mais pendant un secours, il peut être nécessaire de dynamiter un passage exigu afin de passer la civière. Évidemment, le problème se pose d'évacuer les gaz d'explosion. Le cas le plus simple est celui d'une grotte à deux entrées. Un courant d'air naturel parcourt la grotte. Si ce courant d'air est trop faible, il est facile d'adapter sur l'une des entrées, une soufflante qui permettra de maintenir un bon courant d'air permanent. On a intérêt à conserver le sens normal du tube à vent.

Mais si on cherche à créer un courant d'air, c'est qu'en général la galerie est borgne. C'est le cas d'une grotte à une seule entrée ou d'une galerie en dehors du courant d'air de la cavité.

Si une galerie est vraiment trop difficile à ventiler, il faut agrandir les passages avec des burineurs, alimentés par un groupe électrogène placé au dehors ou dans une galerie ventilée. On pourrait aussi utiliser la ventilation naturelle par faux plafond dans le cas où un courant d'air passe à proximité (cf. aérage des mines anciennes, question D-15). Mais la plupart du temps, il faudra songer à dynamiter et donc à ventiler.

Caractéristiques d'un ventilateur. Le ventilateur doit être choisi pour sa capacité à fournir de la pression et non pas en fonction d'un débit d'air (en l'absence de tuyau). Les constructeurs fournissent avec leur machine une courbe appelée caractéristique du ventilateur. Si on en dispose, on connaitra ainsi directement la relation qui lie q_v, le débit volume, à Δp la charge apportée par le ventilateur (en fonctionnement, cette charge Δp sert à vaincre les pertes de charges, notées aussi Δp et occasionnées par les tuyaux et raccords). Le rendement des ventilateurs est de l'ordre de 50%. Il suffit de relever sur le moteur électrique, la puissance électrique et de diviser par deux. Le choix du diamètre du tuyau doit être fait en fonction du débit à apporter et en fonction de la longueur de tuyau. La relation entre les différents paramètres est (cf. tome 2) :

$$\eta\, P = q_v\, \Delta p = \frac{8\, \rho\, \Lambda}{\pi^2} \frac{L\, q_v^3}{D^5} \approx 8.10^{-3} \frac{L\, q_v^3}{D^5}$$

Dans cette relation η est le rendement (de l'ordre de 0,5), P est la puissance du moteur électrique (en W), Δp est la perte de charge du circuit (exprimée en Pa), Λ est le coefficient de perte de charge linéique (fourni par le constructeur du tuyau, de l'ordre de 0,01), ρ est la masse volumique de l'air (de l'ordre de 1,2 kg/m^3), L est la longueur de tuyau (en m), q_v est le débit volume (en m^3/s) et D est le diamètre du tuyau (en m).

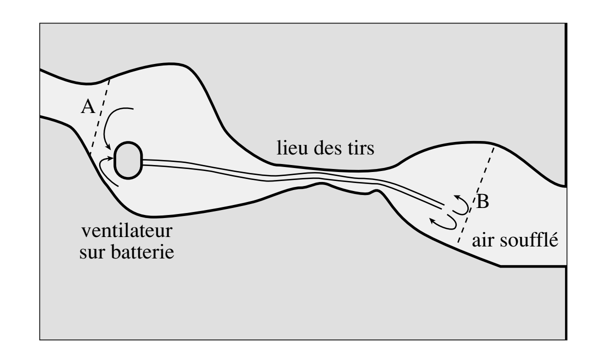
Suivant les cas, on a le choix entre la dilution des gaz toxiques ou le renouvellement de l'air de la galerie.

a) Procédé par dilution

Si un seul dynamitage est nécessaire, l'important est de diluer les gaz toxiques dans un grand volume d'air afin de les rendre inoffensifs. Dans ce cas, il faut brasser l'air de l'explosion avec un ventilateur monté sur accus qui renvoie l'air vicié dans une salle à l'aide d'un tuyau pas très long, créant ainsi un courant d'air en boucle permettant une dilution de l'air vicié avec l'air pur. Cette technique est dangereuse car une concentration élevée de CO peut subsister dans une zone morte (détecteur de CO obligatoire). Ce cas est néanmoins le plus facile. Le choix de la longueur de tuyau doit reposer sur un calcul. La quantité d'explosif utilisé permet de calculer la quantité de CO produite (cf. question D-24). On détermine alors le volume dans lequel on doit diluer le CO pour que la teneur reste acceptable (inférieure à 50 ppm). La topographie du secteur permet de savoir pour quelle longueur on obtiendra le volume. La longueur de tuyau doit être un peu supérieure.

Fig. 2-32- Dilution des gaz issus d'un tir dans un volume d'air V à l'aide d'un ventilateur sur batterie et d'un tuyau de 10 cm de diamètre (le volume V est celui situé entre les sections A et B)

Toxic gas dilution with an autonomous ventilator and a duct



Le blessé est bien entendu situé suffisamment loin pour ne pas subir les désagréments du tir. Ce genre de technique demande une grande rigueur dans la conduite des opérations (rédaction avant le tir d'une note de calcul justifiant les choix, vérification des calculs par deux personnes au moins, communication sans fil entre les équipes de part et d'autre de l'étroiture, masque respiratoire et bouteille pour celui qui contrôle les teneurs en CO…). Une expérience acquise à l'avance permettrait d'aller plus vite.

b) Procédé par soufflage et renouvellement de l'air

Mais en général, on aura à procéder à toute une campagne de tirs afin de mettre au gabarit un méandre étroit par exemple. Il faut alors opter pour la technique du renouvellement de l'air. Si on dispose d'un compresseur et d'une longueur suffisante de tuyaux souples, on renouvelle l'air de la galerie borgne, en soufflant de l'air frais au fond de la galerie. Le soufflage de l'air fait déplacer l'air vicié qui forme une sorte de bouchon qui gagne progressivement la sortie de la galerie. Les détecteurs de CO permettront de suivre la progression du bouchon et il faudra attendre une bonne dilution avant de s'approcher de la zone de tir.

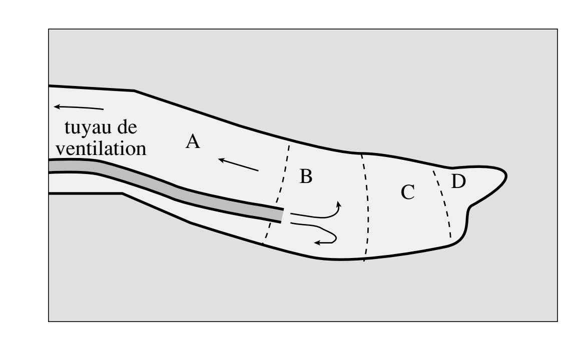


Fig. 2-33- Soufflage dans un conduit borgne.
Les quatre zones des mineurs
(voir texte au-dessous)

Blowing in a blind gallery

Il faut donc traîner, jusqu'au-delà du point à ventiler, un tuyau dans lequel on soufflera énergiquement de l'air. Cet air sortira par l'entrée unique en emmenant les gaz indésirables. La solution qui consisterait à aspirer les gaz toxiques pourrait sembler préférable mais le débit qu'on peut aspirer est plus petit que celui qu'on peut souffler et les tuyaux en cas d'aspiration devront être rigides pour éviter leur écrasement sous l'effet de la pression atmosphérique. En pratique, on ne peut que souffler.

Dans l'exploitation des mines, on définit pour le soufflage quatre zones, la zone A avec courant d'air vers la sortie, la zone B qui est une zone bien ventilée, la zone C qui est une zone intermédiaire avec mouvement mais pas forcément renouvellement de l'air et la zone D qui est une zone morte.

c) Procédé par soufflage et reprise

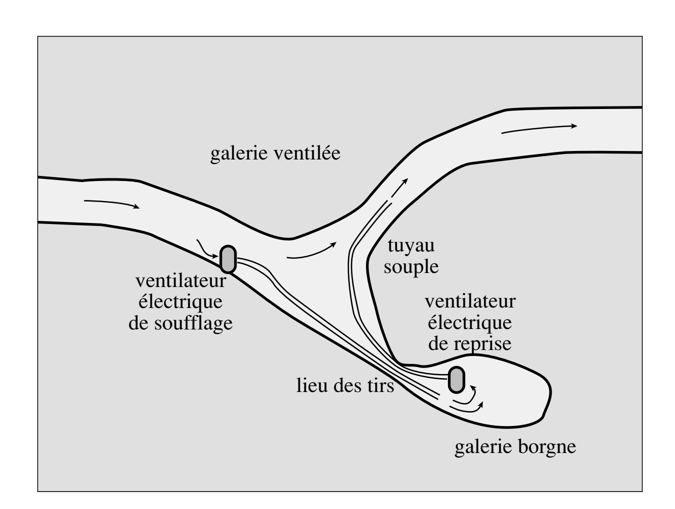


Fig. 2.34- Soufflage d'air frais et reprise d'air vicié
C'est la méthode la plus lourde, mais la plus efficace

Blowing of fresh air and aspiration of toxic air with two compressors

Le procédé par simple soufflage peut s'avérer trop lent. La présence de gros volumes sur le trajet de l'air est en effet rédhibitoire. Dans ce cas, il faut procéder avec deux compresseurs. Le premier est placé à l'extérieur ou dans une galerie ventilée. Il souffle un air neuf de l'autre côté du tir. Un deuxième compresseur disposé symétriquement par rapport au tir récupère l'air et le renvoie à l'extérieur ou dans la galerie ventilée (en aval bien entendu de la prise d'air du premier compresseur). Cette méthode est la plus efficace car le bouchon d'air vicié est rapidement évacué même avec des débits peu importants. Il faut veiller néanmoins à ce que le compresseur de reprise ait un débit supérieur au compresseur de soufflage pour éviter que de l'air vicié puisse emprunter le chemin de la galerie vers la sortie.

Cette méthode nécessite malheureusement deux longueurs de tuyaux et une ligne électrique. Mais comme le volume à renouveler est limité, la puissance des compresseurs et le diamère des tuyaux pourront rester limités aussi.

Calcul de l'installation de soufflage. On détermine d'abord le débit volumique q_v par la condition de renouvellement de l'air. Dans la méthode du soufflage simple, le volume sera le volume total de la galerie parcourue par le bouchon. Dans le cas du soufflage-reprise, le volume sera limité à la zone voisine des resserrements. Le temps de renouvellement sera décidé par les besoins du sauvetage. Par exemple, on voudra que l'air de la galerie empruntée par les spéléos se renouvelle en un quart d'heure. Soit V le volume de cette galerie (estimée sur la topographie en m^3) et t_0 le temps de renouvellement de l'air (en s). On obtient :

$$q_v = \frac{V}{t_0}$$

(Par exemple pour renouveler en une heure, l'air de la grotte de Pré l'étang dans le Vercors, grotte dont le volume est de 3600 m^3 , il faut un débit de 1 m^3/s.)

On en déduit la puissance du moteur électrique nécessaire pour le ventilateur (L est la longueur du tuyau, D son diamètre):

$$P \approx 16.10^{-3} \frac{L\, q_v^3}{D^5}$$

(Par exemple pour renouveler l'air de la grotte de Pré l'étang (dynamitage du boyau à 250 m de l'entrée), avec un tuyau de diamètre 0,2 m, il faut un compresseur actionné par un moteur électrique de l'ordre de 12 kW.)

On voit qu'il vaut mieux augmenter le diamètre du tuyau plutôt qu'augmenter la puissance du moteur. Par exemple dans le cas de la grotte de Pré l'étang, le choix d'un diamètre de 0,1 m serait désastreux puisqu'il conduirait à une puissance de 400 kW ! En revanche, un tuyau de diamètre 0,5 m ne nécessiterait plus qu'une puissance de 130 W. C'est donc sur le diamètre de tuyau qu'il faut jouer impérativement. Il faut disposer de plusieurs diamètres et les choisir en fonction de l'utilisation et des contraintes géométriques des lieux.

On pourra affiner la relation à l'aide des vraies valeurs du coefficient de perte de charge linéïque du tuyau Λ fournies par les fabricants de tuyaux.

Le difficile problème du franchissement de la zone étroite par un tuyau. Toutes les méthodes vues précédemment nécessitent un tuyau dans la zone à dynamiter. Mais les tirs risquent de détruire le tuyau. Comment faire ? Ce problème délicat est à résoudre au cas par cas en fonction de la géométrie de la zone étroite. Mais il est clair qu'un boyau rond de petit calibre posera de redoutables problèmes : comment protéger le tuyau ?

D-23- Peut-on faire du feu sous terre ? Dangers d'incendie liés à l'essence

Il ne faut jamais faire de feu sous terre ! La combustion consomme de l'oxygène, produit du CO_2 et des fumées qui provoquent la toux. Il semble même (accident dans les carrières de Caumont ?) qu'une fois le CO_2 en quantité notable, la combustion puisse produire du CO, 10 fois plus toxique que le CO_2.

L'utilisation des perceuses thermiques (dans un bon courant d'air aspirant) engendre un risque important supplémentaire lié à la présence d'essence pour alimenter le perforateur. De grandes précautions doivent être prises pour la manipulation des bouteilles d'essence et surtout pour le remplissage de la perceuse (éteindre impérativement les lampes acétylènes). Les conséquences d'un incendie d'essence avec quelqu'un du mauvais côté du courant d'air sont malheureusement faciles à imaginer ! Lors du transport, l'essence doit être considérée comme bien plus dangereuse que l'explosif lui-même.

Les mineurs, avant l'utilisation des explosifs, faisaient du feu au front de taille pour abattre le minerai. Mais ils adaptaient des faux plafonds ou ouvraient des puits d'aération tous les 50 m. Dans ces conditions, la fumée est évacuée assez vite. Le délai d'attente le plus grand est le refroidissement de la roche au front de taille (cf. expérience de Tereygeol aux mines de Melle, 2001).

D-24- Quelle quantité de CO produisent détonateurs et cordeaux détonnants ?

D'après les données de la Société de Spéléo Secours de l'Isère (Éric Sanson, cf. aussi France Rocourt et al., sssi.free.fr/rapportexplosif.html), un détonateur électrique (pentrite) produit une quantité de CO qui, diluée dans un mètre cube d'air, fournit 120 ppm de CO (pour 2 m^3 cela fournirait 60 ppm, etc.).

ppm signifie partie par million de volume. Un ppm représente 1 cm^3 de gaz pour 1 m^3 d'air.

De même, un mètre de cordeau détonnant chargé à 6 g de pentrite par mètre fournirait 400 ppm dans un mètre cube d'air.

On peut aussi estimer la production de CO en comptant 75 ppm de CO dans un mètre cube d'air et pour un gramme de pentrite.

D-25- Comment varient les symptômes en fonction de la durée d'exposition au CO ?

On peut se contenter de reproduire la figure communiquée par le Cerchar sur laquelle sont indiqués différents symptômes en fonction de la durée d'exposition et de la concentration en monoxyde de carbone (exprimée en ppm, partie volumique par millions). On voit par exemple qu'une exposition de 60 mn à une atmosphère chargée de 400 ppm de CO conduit en moyenne à des vomissements et que la perte de connaissance n'est pas loin.

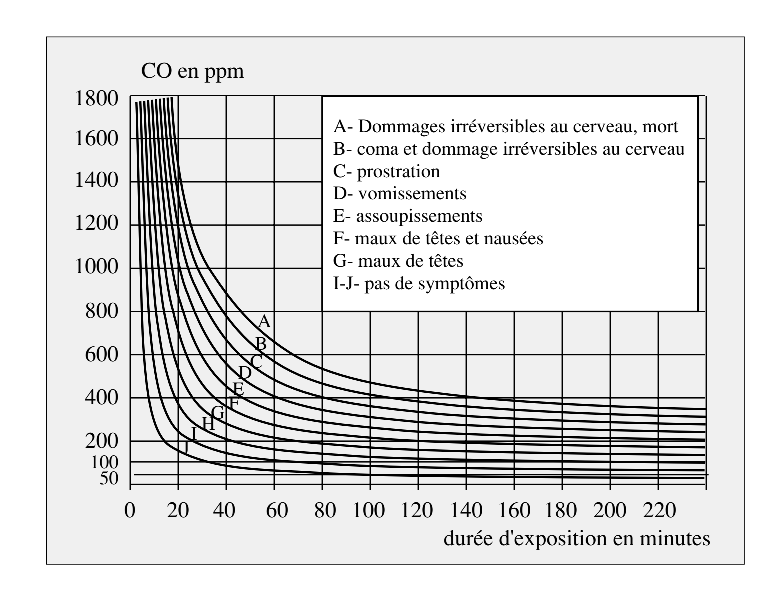


Fig. 2-35- Les effets du monoxyde de carbone (CO)

Carbon monoxide effects on the humans
I-J, no symptom ; A, death

D-26- Comment détecter le monoxyde de carbone ?

Il existe des appareils dans le commerce d'un prix de l'ordre de 500 F qui permettent aux spéléos d'éviter de graves intoxications. Il leur suffit d'appliquer la règle d'une teneur de CO inférieure à 50 ppm. Il leur faudra vérifier si l'acétylène donne un signal. Dans l'affirmative, il suffirait d'éviter la présence de ce gaz dans la zone de tir pour que les mesures restent fiables. Il est prudent malgré tout de comparer les valeurs de ces appareils bon marché avec celles fournies par les appareils plus précis des pompiers ou des spéléos secours.

D-27- Qu'est-ce que l'onde de choc issue d'une explosion ?

On a déjà vu les ondes de choc en A-36. Le spéléo ne doit évidemment pas déclencher le tir à proximité de la charge, même si le courant d'air est dans le bon sens et qu'il est protégé par un coude. D'une part, des rochers peuvent rebondir et d'autre part, le bruit de l'explosion cause des dommages irréversibles à l'oreille interne. L'onde de choc s'atténue avec la distance d'autant plus vite qu'il y a des volumes qui coupent le conduit. On prendra garde aux boyaux en conduites forcées, de roche vive et bien lisse, qui font de magnifiques guides d'onde et laissent groggy le spéléo amateur de première. Le mieux est de procéder au tir dans une salle de bon volume et porter un casque antibruit ou des boules Quiès.

On peut signaler néanmoins qu'au cours d'un secours au Marco Polo en Chartreuse, un tir a été fait à moins d'un mètre d'un spéléo coincé (Éric Boyer). La charge se résumait seulement à un détonateur (sans autre explosif). Des cordes assuraient une sorte de matelas protecteur.

D-28- Une salle peut-elle être soumise à une compression de l'air ?

Une salle isolée du reste de la cavité par une mise en charge hydraulique peut voir sa pression d'air augmenter au fur et à mesure de la montée de l'eau. La pression est inversement proportionnelle au volume d'air, une fois que la salle est isolée. Les pressions partielles de tous les gaz présents dans l'air augmentent alors en proportion. Jacques Choppy appelle ce phénomène aérocompression.

D-29- Peut-on ressentir la narcose à l'azote, l'hyperoxie, dans une cloche sous pression ?

Les troubles que rencontrent les plongeurs au cours de l'exploration de siphons profonds sont dus presque uniquement aux gaz constituant l'air (azote et oxygène) dont la pression partielle est augmentée à cause de la profondeur. Dans le cas d'une salle soumise à une augmentation de sa pression d'air, le spéléo surpris par une crue pourrait rencontrer les mêmes troubles qu'un plongeur en siphon. Ainsi, la narcose de l'azote pourrait apparaître chez un spéléo pour une mise en pression à 5 ou 6 bars (40 ou 50 m de hauteur d'eau), mais ne serait vraiment dangereuse qu'au-delà de 8 bars (soit environ, 70 m de hauteur d'eau). L'hyperoxie ou effet Paul Bert (Juvenspan 1992), est très dangereuse. Elle traduit la neuro-toxicité de l'oxygène comprimé et conduit à une crise convulsive d'apparition brutale. Elle apparaîtrait à une pression totale de l'air de 8 bars (soit une pression partielle de O_2 de 1,6 bars) (Thomas 1996).

On connaît des mises en charge de 40 bars (par exemple à la grotte de la Luire dans la Drôme) mais aucun spéléo ne s'est trouvé piégé dans une bulle d'air dans de telles conditions. L'exemple de la crue des Vitarelles (novembre 1999) montre que cela peut arriver, mais le risque principal reste bien entendu la noyade, par disparition de l'air dans des fissures. Reprenons l'exemple de la Luire ; un spéléo réfugié dans une bulle d'air à la cote -200 m pourrait connaître la narcose de l'azote quand l'eau atteindrait la cote - 150 m et l'hyperoxie quand l'eau atteindrait la cote -120 m. On remarque d'ailleurs qu'il pourrait peut-être repousser le risque d'hyperoxie en mettant sa tête dans un sac, diminuant ainsi la teneur en oxygène !

D-30- Y a-t-il risque d'hypoxie dans une cloche d'air au cours d'une plongée ?

Certaines cloches ont un air de composition différente de celle de l'air atmosphérique. Une pression partielle relative d'oxygène inférieure à 0,16 bar peut générer chez le plongeur une syncope (danger de noyade ensuite). Mais même une cloche de composition semblable à celle de l'atmosphère peut être dangereuse. En effet, suite aux montées et descentes du niveau de l'eau à cause des crues, une cloche peut se trouver à une pression plus petite que la pression atmosphérique. Si cette pression est inférieure à 0,76 bar, la pression partielle d'oxygène tombera à 0,16 bar et il y aura risque de syncope. Le manomètre de plongée indiquerait dans la cloche une profondeur de +3,4 m qui devrait suffire à prévenir le plongeur du risque. Ce risque est encore accru dans les siphons de montagne, puisque la pression est plus faible. Au-delà de 2500 m d'altitude, une acclimatation à l'altitude est nécessaire avant d'effectuer une plongée, ou bien il faut plonger avec un mélange légèrement suroxygéné.

D-31- L'air piégé dans une cloche au cours d'une crue est-il respirable ?

Oui, sans aucun doute, même si un brouillard peut survenir. Il faudrait que la mise en pression soit extraordinaire pour que la pression partielle d'oxygène devienne trop dangereuse (hyperoxie). La narcose par l'azote nécessiterait 4 bars de mise en charge.

Il se peut néanmoins que la présence de déchets végétaux en présence d'une pression partielle d'oxygène élevée, puisse engendrer des réactions d'oxydation rapide entraînant un déficit d'oxygène dans la cloche une fois la décrue effectuée.

D-32- Quelle est la représentation conventionnelle du courant d'air sur les topographies ?

Le courant d'air est représenté sur les topographies souterraines par une flèche avec un empennage sur un seul côté (Fabre, 1978). Le nombre de barbules de l'empennage varie de un à trois suivant l'intensité du courant d'air (un, pour un courant d'air faible, deux pour un courant d'air fort, trois, pour un courant d'air violent). Il est conseillé d'indiquer la date et l'heure de l'observation. Dans cet ouvrage, nous avons omis les barbules, car il n'y avait pas d'ambiguité possible avec les écoulements d'eau.

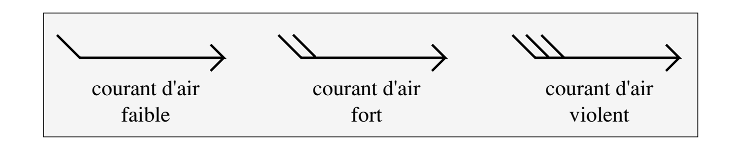


Fig. 2-36- Signes conventionnels pour le courant d'air
Conventional signs for air currents in cave survey

E- Phénomènes thermiques

E-1- Quelle relation y a-t-il entre la température moyenne d'un lieu et celle d'une cavité ?

On dit souvent que la température profonde d'une cavité est la température moyenne du lieu. En réalité, il faudrait affiner un peu pour tenir compte de l'influence de l'eau qui percole dans le sol (Andrieux, Mangin, 1982). Les mesures de Jeannin (1992) indiquent que la température des grands réseaux vérifient tout de même assez bien la propriété énoncée en haut (cf. tome 2, § 4.2.2).

E-2- Quelles sont les modifications apportées par un courant d'air au climat souterrain ?

Le courant d'air modifie le champ des températures et l'hygrométrie. Au point de vue énergétique, les processus d'évaporation et de condensation représentent souvent plus d'énergie que le réchauffement ou le refroidissement. C'est surtout le courant d'air aspirant, c'est-à-dire entrant dans la cavité, qui apporte des modifications. Le courant d'air aspirant froid refroidit les parois et les dessèche. Un courant d'air aspirant chaud les réchauffe et les humidifie. Les mesures du gradient thermique dans les cavités (Jeannin 1992) montrent que l'eau et l'air font à peu près jeu égal.

E-3- Quelle est l'influence de l'eau de percolation sur la température de la roche des cavités ?

Elle est énorme. La température que prend la roche est intermédiaire entre celle qu'auraient l'eau et l'air à la même altitude. En effet, l'augmentation de température de l'eau en raison du travail des forces de pesanteur est de 0,23 °C par cent mètres de descente, alors que pour l'air l'augmentation de température est de 1°C par cent mètres s'il n'y a pas de condensation-évaporation, et de 0,5 °C par cent mètres dans le cas contraire. Les mesures (Jeannin 1992) fournissent, pour les gouffres de montagne, une augmentation de la température comprise entre 0,3 et 0,6 °C par cent mètres.

E-4- Qu'est-ce que la convection ?

On appelle convection, ou cellule convective, un écoulement qui se referme sur lui-même et dont l'origine est une différence de masse volumique de deux colonnes d'air voisines, principalement due à une différence de température.

Le mécanisme de détail en est assez compliqué. Les parois mettent les couches d'air voisines à leur propre température (par conduction thermique). La masse volumique dépend de la température. La répartition de la pression dans la chambre n'est plus hydrostatique. Des gradients de pression motrice apparaissent qui mettent le fluide en route. Ce mouvement atténue les variations de température et le mouvement convectif qui prend naissance dépend de la différence de température et de la dimension offerte à la convection.

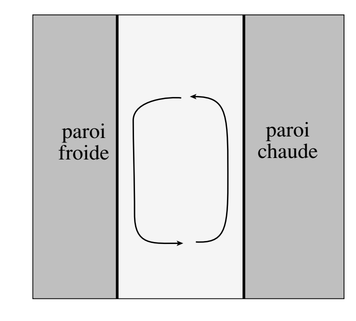


Fig. 2-37- Convection naturelle
Natural convection between two non-isothermic plates

E-5- Le courant d'air dans un tube à vent peut-il être assimilé à une convection ?

Le courant d'air d'un tube à vent peut être considéré comme une énorme cellule convective. Mais on réservera plutôt cette appellation à un courant d'air de convection non canalisé dans des conduits et se développant tout entier dans un volume donné.

E-6- Peut-on avoir un tube à vent à deux entrées de même altitude ?

Un réseau à deux entrées de même altitude peut être parcouru par un courant d'air induit par le vent, par les variations de la pression atmosphérique et même, ce qui semble paradoxal, par un effet de cheminée. Nous examinerons ce dernier point en détail dans le tome 2 (§ 3.6.6.b). Pour que l'effet cheminée puisse exister, il faut des dénivellations. Ce réseau à deux entrées de même altitude doit donc posséder des dénivellations. Il a donc une forme de tube en U. Le mécanisme est analysé à la question suivante. Le sens de ce courant d'air peut être facile à prévoir (entrée plus grosse avec glace ou neige au fond) ou impossible à prévoir. Une fois que ce courant d'air est amorcé, il se maintient.

On voit ainsi, qu'il n'est pas nécessaire de disposer d'une dénivellation entre les deux entrées, mais il faut disposer d'une dénivellation près des entrées.

E-7- Comment fonctionne un tube à vent en U avec deux entrées d'altitudes égales ?

La configuration hivernale, à gauche, d'un air froid située au-dessus d'un air plus chaud est instable. Il s'établit une circulation dans un sens ou dans un autre. Cette circulation étant amorcée, elle persiste car l'air froid entrant dans la branche de gauche est plus lourd que celui remontant dans la branche de droite (qui a eu le temps de se réchauffer dans les parties basses). Le mouvement de l'air se maintient au cours de l'hiver en s'atténuant au fur et à mesure que le trou se refroidit. La vitesse peut atteindre des valeurs comparables à celle d'un tube à vent dont la deuxième entrée s'ouvrirait au point bas.

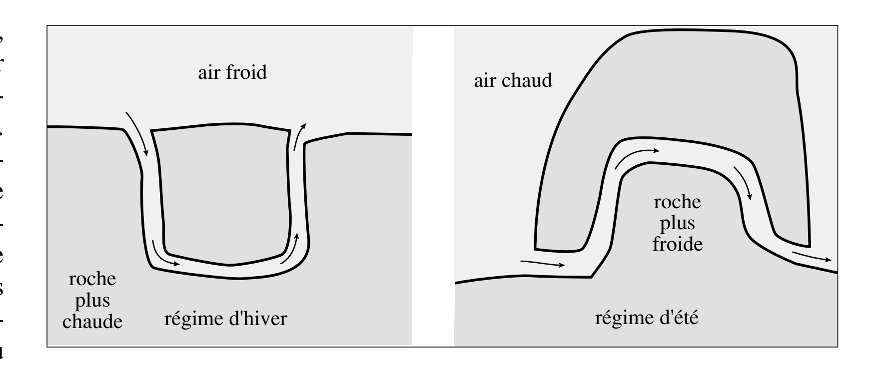


Fig. 2-38- Circulation de l'air dans un tube à vent en forme de U
Air flows in U shape cave

Quand le réchauffement de l'air extérieur survient, il n'y a plus d'instabilité entre l'air à la température profonde de la roche et l'air extérieur. Mais la circulation dissymétrique de l'hiver a rendu le tube en U dissymétrique pour les températures. La branche de gauche est plus froide que la branche de droite. En présence d'un air extérieur plus chaud, un courant d'air va continuer à parcourir le trou. L'air chaud descend dans la branche de gauche, se refroidit au contact de la paroi et remonte tiède dans la branche de droite. Mais ce phénomène ne dure pas longtemps car, l'air entrant réchauffe la branche de gauche et le phénomène ne peut se maintenir. L'hiver suivant, le courant d'air va se rétablir. Il est probable que le sens sera le même que celui de l'hiver précédent, mais des causes inopinées peuvent modifier le sens initial adopté qui se maintiendra alors au cours de l'hiver. Il est donc possible de trouver des cavités dont le courant d'air change de sens d'un hiver à l'autre.

On peut facilement imaginer la configuration symétrique d'un réseau en U inversé (figure de droite). C'est l'été que ce réseau est parcouru par un courant d'air chaud qui en réchauffe les parois. L'hiver, ce trou fonctionne comme un piège à air chaud.

Avec une petite dénivellation entre les deux entrées, on peut avoir un fonctionnement mixte par effet cheminée et piège thermique. Ainsi, il y a continuité entre le fonctionnement en tube à vent et celui en piège à air chaud. C'est le degré de dissymétrie entre les phases hivernales et estivales qui permettra de caractériser le régime. Un tube à vent présente lui-aussi des possibilités de pièges thermiques.

On remarque que dans ce modèle de fonctionnement, les échanges thermiques permettent l'introduction d'une boucle de rétroaction positive. Les conséquences thermiques du courant d'air réagissent sur le courant d'air lui-même en l'amplifiant. Le courant d'air est même créé par la rétroaction, ce qui est la marque d'une instabilité.

E-8- Quels sont les écarts de température entre le courant d'air et la paroi des galeries ?

La température de l'air dans une section donnée, et à un instant donné, résulte des échanges thermiques depuis l'entrée entre l'air et les parois. La température de la paroi résulte, quant à elle, des échanges thermiques avec la roche voisine et avec l'air aux instants passés. On comprend que ces phénomènes soient complexes. Ils seront étudiés dans le tome 2, partie 3.

E-9- Quelle est la répartition des températures en profondeur dans une paroi de grotte à un instant donné ?

La température dans l'épaisseur d'une paroi calcaire se raccorde le plus souvent à une température profonde constante annuelle. Elle peut présenter des oscillations en fonction des températures passées du courant d'air. L'épaisseur de pénétration du front thermique dépend de la fréquence du phénomène. Elle est donnée à la question E-13 .

E-10- Quelles sont les variations de température d'une grotte au cours de l'année ?

Si la grotte est importante en longueur et si elle se développe assez loin de la surface topographique, la température profonde de la grotte ne change pratiquement pas au cours de l'année. Ce sont les zones d'entrée qui présentent les plus grandes variations en température.

E-11- À partir de quelle distance des entrées, la température reste-t-elle constante au cours de l'année ?

Dans les réseaux très ventilés, il faut quelquefois aller assez loin pour trouver des températures constantes. Par exemple 1000 m au Trou qui Souffle de Méaudre et 1200 m à la grotte de la Diau. Dans des réseaux moins ventilés, la distance pour trouver des températures stables n'est que de quelques centaines de mètres.

E-12- Jusqu'à quelle profondeur une pluie influence-t-elle thermiquement la roche ?

Une pluie moyenne qui s'infiltre dans un massif calcaire d'une manière diffuse, rejoint vite la température de la roche. Une pluie de 30 mm par exemple est équivalente pour les inerties thermiques à une épaisseur de 100 mm de calcaire. La pluie donnée rejoindra donc très vite la température de la roche et ne jouera que par effet cumulatif sur la température du massif.

E-13- Jusqu'à quelle profondeur, la température de la surface influence-t-elle la température de la roche ?

En considérant seulement la conduction thermique et en faisant abstraction de l'eau d'infiltration, la profondeur de roche influencée par les fluctuations de la température de surface est donnée par la relation : $e = \sqrt{a\,\Delta t}$

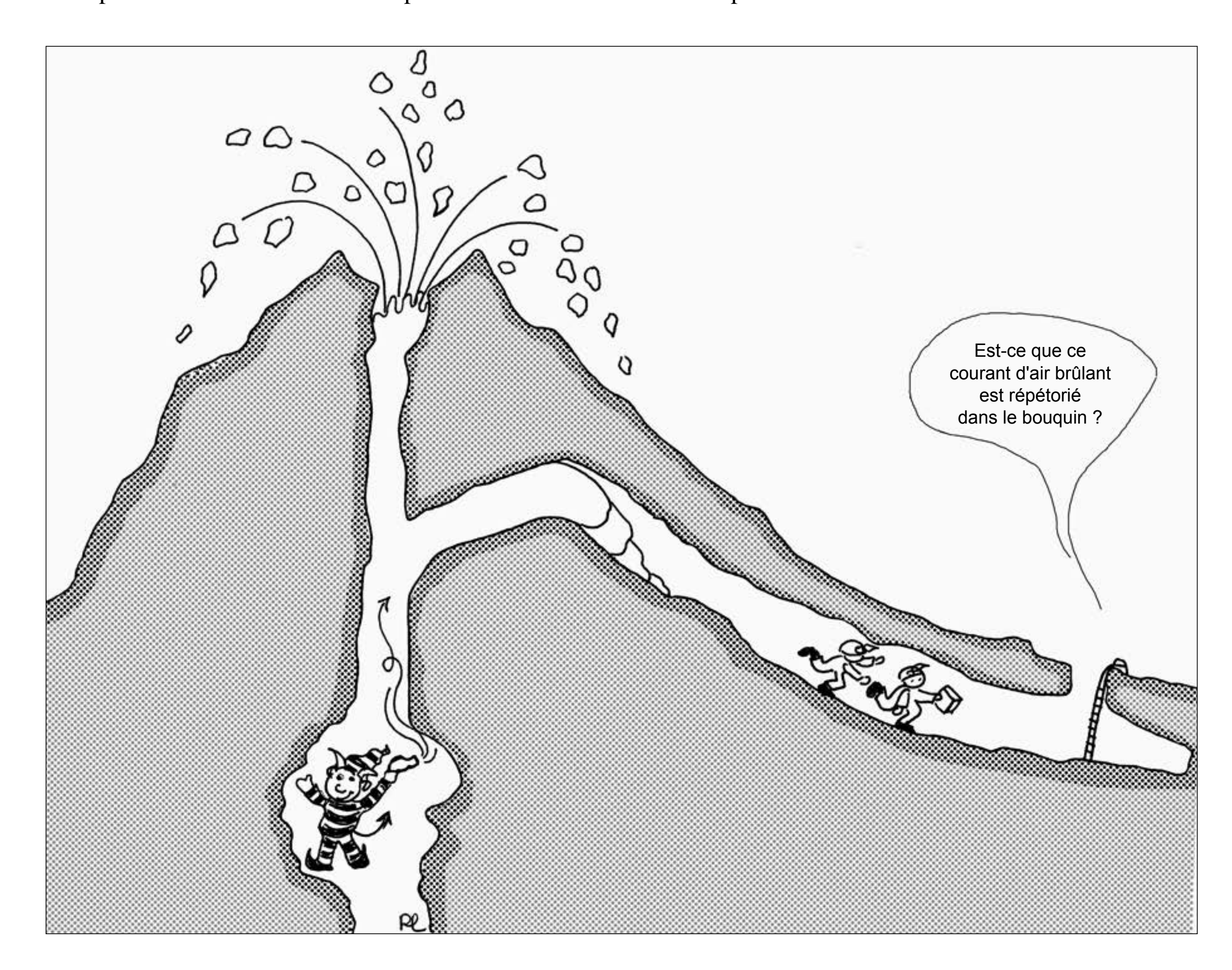


Fig. 2-39- Le flux géothermique est variable d'une région à l'autre !
(dessin de Régine Landry)

Geothermic flux is variable with regions !
(is hot air flow described in the book ?)

Dans cette relation, e est l'épaisseur dite de pénétration du front thermique (en m), a est la diffusivité thermique du calcaire qui dépend de la qualité du calcaire et avoisine 10^{-6} m^2/s, et Δt est la période des oscillations de la température de surface (en s). Pour des variations journalières, la profondeur est donc 19 fois plus petite que celle des variations annuelles. La roche, en l'absence de circulation d'eau, garde en mémoire des renseignements sur les températures d'autant plus profondément que ces variations sont plus lentes. Par exemple, certains géophysiciens voudraient retrouver les traces thermiques des glaciations quaternaires dans l'épaisseur des roches. Mais cela ne serait pas possible en milieu calcaire à cause des circulations d'eau. On reverra cette question au tome 2 § 1.4.2.f.

E-14- Pourquoi en montagne, les trous souffleurs l'été sont plus froids que les grottes avoisinantes ?

Un trou, souffleur en été, a aspiré un air glacé tout l'hiver. Ce courant d'air hivernal a refroidi les parois des galeries près de l'entrée. Pendant l'été, aucun courant d'air brûlant ne vient compenser ce déficit. La température du courant d'air, avant d'atteindre la zone de sortie, est représentatif de la température de la zone profonde, c'est-à-dire de la température moyenne annuelle, mais pas de la température estivale. Le passage sur les parois froides a tendance à le refroidir. D'où un déficit par rapport aux grottes voisines.

E-15- Pourquoi un trou qui souffle l'été exhale un air plus froid que la température profonde de la grotte ?

Voir question au-dessus. En montagne, ces trous sont en général les entrées basses des réseaux.

E-16- Pourquoi les trous aspirateurs l'été sont-ils plus chauds que les trous avoisinants ?

Les trous aspirateurs l'été ont en général soufflé pendant l'hiver. Ils ont donc été préservés de la basse température extérieure. L'été, l'aspiration de l'air chaud les réchauffe. Leur température moyenne annuelle est donc plus grande que celle des grottes voisines non ventilées. Ces trous sont en position haute des réseaux.

E-17- Qu'est-ce que le degré géothermique ?

La terre contient dans l'épaisseur de son écorce des matériaux radioactifs dont l'énergie thermique produite s'oppose au refroidissement du cœur de la terre. Cette production s'échappe à travers les couches géologiques. Ce flux se traduit par un gradient de température qu'on appelle gradient géothermique et qui atteint 2 ou 3 °C par 100 m de descente et qu'on peut mesurer dans les mines. Le degré géothermique est l'inverse de la valeur du gradient. Dans les terrains karstiques, le flux de chaleur peut s'échapper aux points bas des systèmes avec l'eau qui y circule. Cette eau se retrouve donc avec une température plus grande que celle calculable par le seul travail de la force de pesanteur.

E-18- Quelle est la valeur du flux géothermique ?

Elle est très variable suivant les régions. On comprend qu'une région volcanique possède des chambres de magma chaud qui diffusent la chaleur. Le flux moyen qu'on indique habituellement est $\varphi = 0{,}06\ W/m^2$ (La terre, les eaux, l'atmosphère, bureaux des Longitudes chez Gauthier-Villars, Paris).

Une des raisons de la variabilité du flux géothermique est que le fonctionnement thermique de l'écorce terrestre correspond partout à un transitoire. Le régime permanent n'a jamais le temps de s'instaurer (cf. tome 2, § 4.2.2)

E-19- Quelle augmentation de la température de l'eau ce flux provoque-t-il ?

Avec cette puissance $\varphi = 0{,}06\ W/m^2$ et la lame d'eau h qui tombe sur une région pendant une année, il est facile de calculer l'augmentation de température des résurgences :

$$\Delta\theta = 7{,}54\,\frac{\varphi}{h} = 0{,}45\,\frac{1}{h} \quad \text{soit} \quad 0{,}22°\text{C pour une lame d'eau de 2 mètres par an}$$

Ces 2/10 de degré d'augmentation passent souvent inaperçus. Ils sont équivalents à ce que fournit le travail des forces de pesanteur sur l'eau pour 100 m de dénivellation.

E-20- Comment s'effectue le transfert du flux géothermique à l'eau ?

S'il est facile de calculer l'effet moyen, il est très difficile au contraire de savoir comment ce flux arrive à l'eau. Des différences assez grandes sur les résistances thermiques doivent conduire à des variations significatives du champ de température à une altitude donnée. Des mesures fines de température de l'air dans des réseaux non ventilés et dans des galeries parcourues ou non par l'eau montreraient sans doute que les galeries sèches sont plus chaudes que les galeries actives.

On pourrait essayer de mettre en évidence l'influence du flux géothermique en suivant la température des collecteurs dans les parties basses de leur parcours. L'augmentation de température tout le long devrait dépasser celle que l'on pourrait attendre de la dénivellation. Mais l'apport d'affluents provenant de régions moins élevées que celle des réseaux les plus lointains, rendrait difficile l'interprétation des mesures.

E-21- La température dans un gouffre augmente-t-elle ou diminue-t-elle avec la profondeur ?

On peut dire que la température dans un gouffre profond augmente avec la profondeur.

Près des entrées, il peut en être autrement. Par exemple, dans un puits d'entrée jouant le rôle de piège à air froid, la température diminue avec la profondeur. C'est l'observation qu'on peut faire en été. En hiver, l'observation montrerait une augmentation de la température avec la profondeur. Une mesure en continu permettrait de voir que, sur l'année, la température diminue avec la profondeur dans un piège à air froid, et inversement dans un piège à air chaud.

Mais lorsqu'on s'est éloigné des zones d'entrée (qui peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres dans les très grands puits) et pour la majorité des grands gouffres, on constate que la température augmente avec la profondeur. L'augmentation de température est intermédiaire entre celle que provoque le travail des forces de pesanteur sur l'eau de percolation (0,23°C/100 m) et celle sur l'air qui circule (0,5 à 0,98 °C/100 m). Elle vaut à peu près 0,5°C/100 mètres de descente (cf. question E-1).

La plus grande augmentation pour l'air, 4,18 fois plus que pour l'eau, provient de la capacité thermique massique 4,18 fois plus faible pour l'air que pour l'eau 9,8 = 2,35 x 4,18.

Bien évidemment, des gouffres particuliers, en relation avec des circulations d'eau d'origine hydrothermale, pourraient présenter des variations exotiques de température.

E-22- Dans une galerie non ventilée, les températures de l'eau et de l'air sont-elles identiques ?

Certains observateurs trouvent que l'eau a une température toujours plus basse de 1°C que l'air (loi du degré de de Joly, Choppy, 1990). Cette propriété ne peut pas exister à l'équilibre. Là où cette relation existe, les deux systèmes eau et air ne peuvent être considérés en équilibre thermique. Il faudrait examiner ces grottes en particulier pour savoir si ce déséquilibre subsiste toute l'année, s'il provient de la proximité à la surface, du flux géothermique ou d'autres raisons comme l'altitude différente de l'eau d'infiltration.

F- Les courants d'air et l'eau

F-1- Pourquoi l'atmosphère des grottes est-elle le plus souvent saturée d'humidité ?

On sait que l'air au voisinage immédiat d'une étendue d'eau se trouve à 100 % d'humidité (saturation). Dans l'atmosphère extérieure, l'air au voisinage immédiat de la mer se trouve à 100 % d'humidité. Pourtant l'atmosphère extérieure n'est pas saturée partout. Comment expliquer cela ? L'atmosphère est souvent instable et l'air chaud monte en altitude. Cette montée est une détente quasi-adiabatique. Il y a condensation et pluie. Si une partie de l'air monte, il est nécessaire qu'une partie descende. Cet air qui redescend a perdu de son humidité, il n'est donc plus saturé en humidité quand il arrive au niveau de la mer. C'est pour cette raison que même au-dessus de la mer, l'air n'est pas toujours saturé en humidité.

Si l'atmosphère était parfaitement stable et isotherme, aucun mouvement ne l'agiterait. L'humidité de l'air gagnerait par diffusion l'ensemble de l'atmosphère qui resterait saturé. L'alternance du jour et de la nuit et des saisons empêche l'atmosphère de rester isotherme. Cela suffirait pour créer des bruines la nuit et dessécher partiellement l'air le jour. Mais ce phénomène est beaucoup moins efficace que les grands brassages de l'atmosphère.

Dans les cavités naturelles sans courant d'air, l'air est naturellement stable. La présence de quelques sources d'eau (suintement aux parois, ruisselets, lacs souterrains…) suffit pour que l'humidité de l'air atteigne la saturation. Le fait que la température reste à peu près constante va dans le même sens.

On en déduit aisément dans quelles conditions l'air d'une cavité ne sera pas saturé :

- D'abord, les grottes désertiques dont le creusement date d'une époque plus humide, ou les grottes dont l'origine est hydrothermale et dont les conditions de la formation ont disparu.
- Ensuite, les entrées basses de réseau à courant d'air en régime hivernal.
- Enfin, au cœur d'une cavité, on peut localement trouver des portions plus sèches que dans le reste de la cavité. Par exemple, dans une galerie avec un bon courant d'air, et à l'issue d'une descente significative (100 m ou plus). La compression est alors quasi-adiabatique, il y aura dessiccation de l'air. Dans une galerie à faible courant d'air, à l'issue d'une remontée, si la détente est quasi-isotherme. On sait en effet qu'une détente isotherme s'accompagne aussi d'une dessiccation. Mais la remontée d'un courant d'air dans une galerie ne pourra s'accompagner d'une dessiccation de l'air que s'il n'y a pas d'apports d'eau à la paroi, car les phénomènes de transport de chaleur (apports) qui permettent à la température de rester constante joueraient de la même façon pour obliger l'air à garder la saturation (évaporation à la paroi).

F-2- Quelles sont les causes d'apparition d'un brouillard ?

Elles sont multiples, mais toutes correspondent à l'apparition d'une sursaturation de l'air. Le refroidissement d'un air déjà humide, la détente rapide d'un air humide et saturé, le mélange de deux masses d'air déjà saturées en humidité, la compression lente d'un air saturé, voilà les causes principales de l'apparition d'un brouillard. Les phénomènes peuvent être multiples. Ainsi le soleil chauffant une paroi humide évapore de l'eau. Cette vapeur passe dans l'air voisin qui n'est guère réchauffé par le soleil (l'air absorbe très peu les rayons lumineux) et se refroidit, d'où condensation. On voit alors un panache de brouillard s'échapper de la paroi au soleil.

F-3- Pourquoi y-a-t-il un brouillard dans certaines salles ?

En général, le brouillard dans une salle démontre l'existence d'un mélange de deux courants d'air. Ces deux courants d'air sont près de la saturation et de températures différentes. L'apparition à certaines époques de brouillard dans une salle permet de deviner une arrivée de courant d'air donc une suite potentielle (cf. salle Guillaume à la Cañuela, § 1.7.4).

On peut aussi observer un brouillard dans une salle avec un courant d'air et une douche d'eau plus froide arrivant au plafond (salle Hydrokarst au Trou qui Souffle). L'eau froide refroidit une partie de l'air qui devient sursaturé.

F-4- Pourquoi le mélange de deux airs saturés fournit-il un brouillard ?

La raison vient d'une propriété géométrique de la courbe de saturation de la vapeur d'eau dans l'air. En effet, elle présente une concavité vers le haut. La relation de Clapeyron étant de type exponentiel justifie cette concavité.

F-5- Dans quelles conditions, des fines nappes horizontales de brouillard peuvent-elles apparaître ?

Un courant d'air froid qui sort d'un grand porche a tendance à rester en bas (fleuve d'air froid). De l'air chaud par recirculation thermique entre en haut et se mélange partiellement à cet air froid, d'où apparition de brouillard si l'air chaud est presque saturé en vapeur d'eau (jour humide), cf. § 1.7.7.

F-6- Quelle est la taille des gouttelettes dans un brouillard ?

Elle est variable suivant le mode de formation et les phénomènes de coalescence qui ont pu arriver. La taille est comprise entre 0,5 micromètre et 100 micromètres.

F-7- Pourquoi un brouillard arrête-t-il les faisceaux lumineux ?

L'eau est transparente au rayon lumineux. Mais les gouttes d'eau du brouillard réfractent et renvoient le faisceau dans toutes les directions en l'absorbant un peu. Ces diffusions multiples augmentent considérablement la longueur parcourue par le faisceau et contribuent à faciliter son absorption par l'eau.

F-8- L'opacité d'un brouillard traduit-elle la quantité d'eau contenue par le brouillard ?

La transmission d'un faisceau lumineux dépend d'une longueur. Cette longueur résulte du rapport entre un volume d'eau et l'aire de la surface des gouttes (aire interfaciale). Un flux lumineux de puissance initiale Φ_0 voit sa puissance diminuer en fonction de la distance x parcourue, suivant la loi :

$$\Phi(x) = \Phi_0 \exp\left(-\frac{\Gamma x}{4}\right) \quad \text{avec} \quad \Gamma = \frac{6\,\alpha}{D_s} \quad \text{et} \quad D_s = \frac{\sum_i n_i D_i^3}{\sum_i n_i D_i^2}$$

avec Γ densité d'aire interfaciale (en m^{-1}), c'est la surface de toutes les gouttes divisée par le volume total qui les contient. α fraction volumique en (m^3/m^3) et D_s est le diamètre de Sauter de la distribution.

On voit ainsi que la transmission dépend de deux paramètres, la quantité d'eau et la taille moyenne des gouttelettes.

F-9- Pourquoi le brouillard peut-il disparaître ?

Les gouttes du brouillard peuvent s'évaporer si l'air environnant n'est plus saturé (augmentation de la température, augmentation rapide de la pression …). On cite un exemple au § 3.2.3 de disparition quasi-instantanée d'un brouillard sous l'action d'une surpression due à une rafale de vent.

F-10- Pourquoi la quantité de vapeur que peut contenir l'air est-elle limitée ?

Parce que l'air est à une température plus basse (à la pression ordinaire) que la température d'ébullition de l'eau (100 °C à la pression de 1 bar). Un air à 110°C pourrait contenir autant de vapeur d'eau qu'on veut.

À température ambiante, la quantité d'eau en excédent se présente sous la forme de gouttes de brouillard.

F-11- Quelle quantité d'eau de condensation, le brouillard peut-il fournir ?

Au maximum, il pourra fournir la quantité d'eau qu'il possède sous forme de vapeur. Cela correspond à quelques grammes par m^3 d'air. Mais en général, il en fournira beaucoup moins. À 5°C, 5 g de vapeur par kg d'air, à 10°C, 7,5 g de vapeur par kg d'air, et à 20°C, 15 g de vapeur par kg d'air (cf. tome 2, § 1.1.4).

F-12- Qu'est-ce que la courbe de saturation de vapeur dans l'air ?

C'est la quantité maximale de vapeur que peut contenir de l'air à une température donnée. Le diagramme correspondant, appelé diagramme de l'air humide ou diagramme psychrométrique, se trouve dans le tome 2, § 1.1.4.

F-13- Le courant d'air peut-il former des ruisselets par condensation ?

Un débit d'air pourra fournir un débit d'eau de condensation. Par exemple, un débit d'un mètre cube par seconde d'air saturé se refroidissant de 30°C à 10°C peut fournir un débit d'eau de 20 g/s soit à peu près 1 litre par minute.

F-14- Dans quelles conditions un courant d'air fournit-il le plus d'eau ?

André Bourgin (dans une étude faite vers 1945, restée je crois inédite et communiquée par son fils Renaud) signale la possibilité maximale de production d'eau par un courant d'air. Le courant d'air chaud et saturé d'humidité vient se refroidir sur la glace. Le refroidissement de l'air fait condenser la vapeur d'eau en excès dans l'air et le réchauffement de la glace se traduit par la fonte et une production d'eau.

Considérons par exemple un air à 20°C (soit 14,9 gramme de vapeur par kilogramme). Le refroidissement de cet air jusqu'à la température de 2°C fournit une condensation de 10,6 g d'eau par kilogramme d'air. Se rajoute une libération de chaleur (différence d'enthalpie 63 - 18 kJ/kg mesurée sur le diagramme psychrométrique) de 45 kJ/kg. La chaleur latente nécessaire pour fondre la glace est $3{,}35.10^5$ $J.kg^{-1}$. Cette énergie permet de fondre 134 g de glace par kg d'air qui circule, soit au total 145 g d'eau par kg d'air.

Ainsi dans ce processus, la fonte de la glace intervient pour 93 % et la condensation pour seulement 7%.

On peut comparer cette production d'eau à celle que fournirait 1 kg d'eau de pluie à 20 °C tombant sur la glace. Cette eau amènerait 75,3 kJ/kg qui permettrait de fondre 225 g de glace, pas tellement plus que l'air.

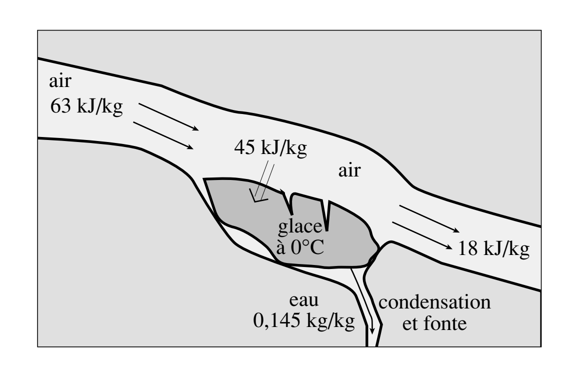


Fig. 2-40- Condition record d'obtention d'eau. Air chaud saturé et glace fondante

The record conditions for water generation : saturated warm air and ice

On voit que le processus imaginé par Bourgin est très efficace, bien plus que la simple condensation (cf. aussi tome 2, § 1.5.1.f).

F-15- Qu'est-ce qu'un air sursaturé ?

La vapeur ne peut se condenser que si des germes de condensation existent dans l'air (rugosité de paroi, ions en suspension, poussières…). En l'absence de ces germes de fixation de la vapeur pour former des gouttes, l'air reste sursaturé. Il peut quitter cet état (métastable) brutalement. Le brouillard se forme alors très vite.

F-16- Pourquoi éprouve-t-on une impression d'étouffement dans certaines grottes ?

Cette impression qu'on ressent parfois est due au caractère sursaturé de l'air chaud qui pénètre très vite dans une cavité plus froide. La condensation est en retard et la faible sursaturation de l'air donne la sensation de se noyer. On ne reste en général pas longtemps dans ces zones (cf. § 1.7.2).

Il est bien évident qu'une grotte qui souffle du dioxyde de carbone pourrait fournir une impression d'essoufflement, mais pas du même genre.

F-17- Pourquoi l'eau se dépose sur les parois dans certains cas, ou forme un brouillard dans d'autres cas ?

Si la paroi est un peu plus froide que l'air (courant d'air chaud entrant par exemple), la vapeur a tendance à se condenser sur elle (paroi froide de Watt). En revanche si la paroi est un peu plus chaude que l'air (mélange de deux courants d'air par exemple), la condensation aura tendance à se former dans l'air.

F-18- À quoi sont dues les gouttelettes brillantes comme des catadioptres sur certaines voûtes ?

On observe fréquemment ces gouttes au plafond des galeries à courant d'air aspirant (labyrinthe du Guiers Mort, salle de la Carène à la Diau …). Ces gouttes brillent tellement (renvoient le faisceau lumineux) que certains ont cru y reconnaître la lumière du jour (le chanoine Bandet au 19e siècle au Guiers Mort). L'examen de ces gouttes montre un dépôt argenté à la surface dont j'ignore la composition (calcite ?).

F-19- À quoi est dû un trou qui fume ? Dans quelles conditions un trou pourra-t-il fumer ?

Un trou souffleur peut fumer par mélange de deux airs près de la saturation. Par exemple, le trou souffle un panache d'air tiède se mélangeant à un air extérieur très froid (aven Jolivol, Trou qui Souffle de Méaudre, Gour Fumant d'Herbouilly, Trou Qui Fume à Furfooz…). Ou bien le trou souffle un air glacé saturé dans un air tiède après une pluie (Trou qui Souffle, Saint de Glace …). Dans ce dernier cas, la fumée (brouillard) rampe par terre, ce qui est moins spectaculaire. La condition pour que le brouillard survienne est que le mélange se traduise par une sursaturation de l'air (cf. § 1.7.5).

F-20- Pour un courant d'air sortant d'une cavité, à quel endroit du panache naît le brouillard ?

Le brouillard naît dans la zone de mélange, c'est-à-dire à la périphérie du panache d'air qui sort.

F-21- Pourquoi un courant d'air sur la peau mouillée semble plus froid que sur la peau sèche ?

L'échange au contact d'une peau humide se fait en chaleur sensible et en chaleur latente. On montre qu'avec l'humidité la perte est 2,80 fois celle sans humidité pour des températures voisines de 15 °C. C'est donc très sensible (voir aussi tome 2, § 1.5.3).

F-22- Pourquoi les parois de certaines grottes sont-elles très humides ?

Le ruissellement dans les fissures amène de l'eau à la surface des galeries. Cette eau s'évapore jusqu'à ce que l'air soit saturé. Le surplus maintient l'humidité de la paroi.

La condensation de l'air chaud qui pénètre dans une grotte plus froide génère aussi des ruissellements d'eau sur les parois.

Enfin, la circulation dans une galerie, même sans courant d'air, d'un ruisseau plus froid que les parois et la voûte, génère un mouvement de convection naturelle qui engendre un flux de chaleur et d'eau vers les parois et la voûte. La condensation sur la voûte est due à un mécanisme de paroi froide de Watt (cf. tome 2, § 4.4.2).

F-23- Pourquoi les parois de certaines grottes sont-elles sèches ?

Pour qu'une paroi soit sèche, il est nécessaire qu'il n'y ait pas d'arrivée d'eau par les fissures de la paroi. Un courant d'air se réchauffant en parcourant la grotte permet l'assèchement des parois (exemple du Trou qui Souffle l'hiver, de la Diau en hiver …). Enfin et plus rarement dans une cavité profonde, un courant d'air saturé qui effectue une descente significative peut provoquer un dessèchement des parois par effet de Föhn (cf. question L-10).

F-24- En quelle saison une entrée basse voit-elle un dessèchement, une humidification des parois ?

Une entrée basse aspire pendant l'hiver. Cet air froid se réchauffe progressivement. Son humidité relative diminue, donc il peut assécher les parois. En revanche en été, l'air profond de la grotte se refroidit au contact des parois de l'entrée basse (qui ont été refroidies pendant l'hiver). Cet air sortant se refroidit et dépose une légère condensation sur les parois (galerie de la Condensation au Trou qui Souffle). Si la neige envahit cette entrée basse, elle aura tendance à rester toute l'année.

F-25- En quelle saison une entrée haute voit-elle un dessèchement, une humidification des parois ?

Pour une entrée haute en été, le courant d'air est aspirant. L'air se refroidit et une condensation forte se dépose sur les parois. Si l'entrée supérieure ne constitue pas un piège pour les chutes de neige, la température de ses parois sera plus élevée que celle de la partie profonde de la grotte. En hiver, l'air qui sort par cette entrée se réchauffe un peu vers la sortie provoquant un léger assèchement des parois. Si la neige envahit l'entrée supérieure, elle contrecarrera cet effet, mais le courant d'air aura tendance à fondre la neige.

Une entrée haute en été, même sans courant d'air mais constituant la perte d'un ruisseau de surface, voit ses parois s'humidifier puisque l'eau qui se perd a une température supérieure à celle des parois (cf. aussi tome 2, § 4.4.2).

C'est sans doute à la condensation de l'eau sur les parois qu'on peut rattacher l'observation de végétation accrochée aux parois en dessous d'une certaine cote dans un puits aspirant. Ainsi, l'aven du plan de l'Ormeau du Petit Plan de Canjuers à Aiguines dans le Var aspire un débit d'air de 50 l/s en été et présente de la mousse entre -20 et -40 m de profondeur.

F-26- Sur quelle distance un courant d'air aspirant l'hiver peut-il dessécher les parois d'une cavité ?

L'observation dans des cavités bien ventilées montre que l'influence peut dépasser le kilomètre :au Trou qui Souffle la zone influencée s'étend jusqu'à la Conciergerie (cf. question E-11), et à la grotte de la Diau, la zone va jusqu'à la cascade Bocquet, au moins au cours des étiages d'hiver.

F-27- Comment l'air peut-il se trouver en dépression dans un siphon (chambre de Torricelli) ?

Ce cas est assez rare mais a été observé plusieurs fois. On peut trouver des poches en surpression et des poches en dépression. Elles sont dues aux variations du niveau piézométrique de l'eau au cours des crues (cf. golet du Groin § 1.1.4). La poche en dépression correspond à un état transitoire car l'eau devrait compenser cette dépression en dégazant progressivement l'air dissout.

La chambre de Torricelli est un autre nom pour désigner des cloches d'air en dépression. Le plongeur émergeant dans cette cloche voit son profondimètre indiquer des profondeurs négatives. Dans une cloche en compression au contraire, le profondimètre indique au plongeur qu'il est encore sous l'eau.

F-28- Quelle vitesse limite est atteinte par l'eau des cascades ?

L'eau en l'absence du freinage de l'air aurait une vitesse à l'arrivée au pied de la cascade fournie par la formule de Torricelli (U en m/s, g = 9,81 m/s², h en m).

$$U = \sqrt{2\ g\ h}$$

Si les gouttes d'eau ont atteint leur vitesse limite, c'est que la force exercée par l'air et les parois est égale au poids de l'eau qui tombe. Une goutte d'eau isolée qui tombe, est soumise à des forces de cisaillement dues aux frottements avec l'air. Ces forces de cisaillement ont tendance à la fragmenter si elle est trop grosse. Ainsi, une goutte atteint au bout d'une certaine distance une dimension limite. Pour cette dimension, sa vitesse limite de descente est à peu près 8,9 m/s. La cascade est constituée de nombreuses gouttes (cf. tome 2, annexe A.4.2).

F-29- Quelle est la vitesse maximale du courant d'air engendré par une cascade sous terre ?

L'eau qui tombe dans une cascade se trouve dans un volume qu'on peut appelé gerbe de la cascade. Mais celle-ci n'est pas entièrement constituée d'eau. La section de la gerbe augmente vers le bas. Et comme la vitesse de l'eau reste à peu près constante, on en déduit que la quantité d'eau par unité de volume décroît vers le bas.

En général, ce volume d'eau par unité de volume est petit devant un. C'est-à-dire que la gerbe contient (en volume) essentiellement de l'air.

La vitesse limite de l'eau est un peu plus grande que la vitesse limite de l'air entraîné par l'eau. Elle est de l'ordre de 10 à 20 m/s (soit 35 à 70 km/h).

Par exemple une cascade de 50 litres/seconde répartie sur 6 m^2 de section dans un puits de 20 m^2 de section et de 30 m de hauteur, entraîne l'air en son sein à la vitesse de 6 m/s, soit un débit d'air de 36 m^3/s. Ce débit remonte dans le puits à l'extérieur de la cascade à la vitesse moyenne de 2,7 m/s pour constituer une circulation bouclée.

Quand la hauteur de chute est suffisante, la vitesse de l'air entraîné ne dépend plus de la hauteur de chute de l'eau, mais principalement du débit d'eau par unité de surface de cascade.

Mais un débit d'eau de 2 l/s occupant la même surface engendre un courant d'air de recirculation non négligeable d'un débit de 13 m^3/s. Ce phénomène est une grave source d'erreur pour le spéléo qui a tendance à confondre un courant d'air de recirculation avec un courant d'air ordinaire (cf. § 1.8.1, 1.8.2, tome 2 annexe A.4.2).

F-30- Quelle surpression peut fournir une cascade remplissant un puits ?

Cette configuration est celle qui fournit la plus grande charge à l'air. Par exemple dans le cas d'un débit de courant d'air nul en moyenne, l'air est obligé de lutter pour rester en place globalement et il ne peut le faire que grâce à un bon gradient de pression. La surpression peut être importante, elle dépend du débit de l'eau, de la section du puits, de la hauteur de la cascade et surtout de la configuration géométrique du lieu. Elle sera inférieure dans tous les cas à $\rho\ g\ h$ (ρ étant la masse volumique de l'eau = 1000 kg/m^3, g l'accélération de la pesanteur = 9,81 m/s^2 et h la hauteur de la cascade), mais elle est souvent beaucoup plus faible.

Dans le cas d'une cascade de débit q_m dispersée d'une manière homogène dans un puits de section constante S et de hauteur h, la surpression engendrée par la cascade est calculée dans le tome 2, annexes A.4 et vaut (en Pa) :

$$\Delta p = \frac{q_m}{S} \frac{g\ h}{U^* + U_a}$$

Dans cette relation U^* est la vitesse limite d'une goutte d'eau dans l'air soit 8,9 m/s, U_a représente la vitesse moyenne de l'air qui circule dans le puits. Elle est comptée positivement si elle est vers le bas et négativement si elle est vers le haut. La relation montre l'existence d'une asymptote pour $U_a = -U^*$, c'est-à-dire un courant d'air remontant à contre-courant de l'eau, capable de supporter le poids d'une goutte. Si le courant d'air pouvait supporter la colonne du puits partiellement remplie d'eau (η = rapport des volumes = Veau/Vpuits), on aurait affaire à une sorte de lit fluidisé soutenu par la surpression de l'air au bas de la colonne. Cette surpression est facile à calculer. Elle vaut $\Delta p = \eta\ \rho_e\ g\ h$ (avec $\rho_e = 1000\ kg/m^3$, masse volumique de l'eau). La différence de pression ne peut devenir infinie. Sa valeur est limitée par la surpression pour obtenir un lit fluidisé. L'asymptote de la relation plus haut correspond au passage d'un écoulement d'eau dispersée à un écoulement d'eau traversé par des chenaux d'air qui se tordent et changent de positions rapidement. Cette topologie est caractéristique des lits fluidisés.

Les anciens mineurs, qui ne disposaient pas de ventilateurs pour renouveler l'air de leur exploitation souterraine, ont imaginé des systèmes où une douche bien répartie dans le puits d'accès crée une pression motrice qui amorce un courant d'air vers le puits de sortie.

F-31- Quelle vitesse d'air peut-on obtenir à partir d'une surpression donnée ?

Dans un rétrécissement compris entre deux salles dont l'une est en surpression par rapport à l'autre, on peut mesurer une vitesse $V = \sqrt{2\ \Delta p / \rho}$ quand la différence de pression est faible. La vitesse maximale qu'on peut obtenir est la vitesse du son (330 m/s dans les conditions ordinaires de température). Elle est obtenue dès que le rapport des deux pressions dépasse 1,9. L'ingénieur Suédois Gustav de Laval a montré qu'une configuration choisie (la tuyère de Laval ou convergente-divergente) permettait de dépasser facilement la vitesse du son et d'obtenir alors des écoulements supersoniques (caractérisés par le nombre de Mach = u/c_0, c_0 étant la vitesse locale du son).

G- Les courants d'air, la neige et la glace

G-1- À quoi est due la glace à l'entrée de certains trous ?

Elle est due la plupart du temps au gel de l'eau sous l'action du courant froid aspiré. Elle peut provenir aussi du gel de l'eau sur une paroi refroidie antérieurement par un courant d'air froid. Elle provient éventuellement d'une transformation de la neige en glace dans des puits exposés aux chutes de neige.

G-2- Quelles formes prennent les concrétions de glace ?

Elles peuvent ressembler aux concrétions de calcite quand l'eau sort d'une fissure, stalactites, stalagmites. Elles peuvent former des draperies, mais on ne connaît guère de fistulaires de glace.

G-3- Comment un courant d'air peut-il modeler une paroi de glace ?

C'est le phénomène de fonte et de sublimation. Le courant d'air chaud fond la neige, et l'eau s'échappe en goutte sculptant au passage la neige. De l'air froid mais non saturé conduit aussi à un modelage par transformation directe des cristaux de neige en vapeur (phénomène de sublimation). Les mêmes causes engendrant les mêmes effets, des coups de gouges peuvent se développer dans la neige. Ils sont d'une taille plus grande que ceux qui se forment dans l'eau pour la simple raison que la viscosité cinématique de l'air est 15 fois plus grande que celle de l'eau, donc à vitesse équivalente la taille sera 15 fois plus grande.

G-4- Comment l'air sculpte-t-il des coups de gouges dans la glace, dans la neige ?

Commençons par examiner le mécanisme de formation des coups de gouges dans l'eau. L'origine des coups de gouge

sur le calcaire est liée à une instabilité hydrodynamique de l'écoulement de l'eau sur une paroi. Tout n'est pas parfaitement compris. La couche limite se décolle et vient se recoller un peu plus loin. La corrosion étant plus importante au niveau du recollement du fait de fluctuations turbulentes, la concavité se maintient et la forme demeure tout en s'enfonçant dans la roche.

Pour l'air venant lécher la glace, le processus est analogue. L'échange thermique est facilité par l'apparition de la turbulence au niveau du recollement. Cette apparition est liée à une longueur de parcours. Cette longueur est d'autant plus petite que la vitesse est plus grande. La longueur caractéristique du coup de gouge est alors inversement proportionnelle à la vitesse de l'air au voisinage de la paroi (cf. aussi tome 2, § 1.4.3.k).

La relation utilisable est $U\,L = 0{,}4$ avec U en m/s, L en m.

G-5- Comment fonctionnent les glacières naturelles ?

Une glacière est un trou ouvert sur le ciel qui peut se remplir partiellement de neige ou bénéficier de glace de regel. L'été, l'air froid préserve cette neige de la fonte. Certaines glacières naturelles sont situées à des altitudes relativement basses. Il faut alors des conditions particulières pour empêcher l'air chaud de l'été de fondre la neige. Ces conditions sont : une entrée tournée vers le nord, protégée par des arbres, un trou en forme de sablier avec étranglement au milieu qui isole la partie basse, une circulation d'eau assez faible … On étudiera cela en détail dans le tome 2, § 3.1.2.

G-6- Comment un courant d'air soufflant empêche un trou d'être bouché par la neige en hiver ?

Le courant d'air, si le trou n'est pas trop élevé, se trouve à une température positive. La neige, qui arrive sur le sol au niveau du trou, fond et le trou reste ouvert, sauf si une avalanche brutale de neige bouche le trou d'un seul coup.

G-7- Un trou peut-il être bouché par la glace, la neige en hiver ?

Oui, les trous sans courant d'air, démarrant par une entrée descendante peuvent facilement être bouchés par la neige. De même, un courant d'air aspirant peut geler l'eau de percolation près de l'entrée. Ainsi, un certain hiver, le Trou qui Souffle s'est révélé sans courant d'air avec un beau bouchon de glace à l'entrée (cf. § 1.1.3).

G-8- Un trou bouché par la neige ou la glace peut-il s'ouvrir à nouveau ?

Un trou qui reçoit des avalanches de neige l'hiver voit son courant d'air stoppé. Il faut des changements lents de la température extérieure pour que le trou se rouvre. Un phénomène de relaxation lié à l'ouverture plus ou moins périodique d'un trou bouché le reste du temps est décrit au § 1.6.6.

G-9- Est-ce que le réchauffement de l'atmosphère a une influence sur la neige des trous de montagnes ?

On constate depuis les années 80 une diminution des quantités de neige dans les trous français. Par exemple, à Isèye, dans les Pyrénées Atlantiques, un trou comme le souffleur de Liet (1780 mètres d'altitude) a perdu des centaines de mètres cubes de névé. Au Parmelan à 1500 mètres d'altitude, la descente du niveau de la neige dans certains trous atteint 10 m (jusqu'à 50 mètres au gouffre Alice). Mais la diminution des précipitations hivernales suffiraient à expliquer ce phénomène. D'une manière générale, l'atmosphère est le lieu d'interactions complexes. Des faits peuvent être établis (augmentation de la température, augmentation du taux de CO_2) mais il faut se garder d'établir des relations de cause à effet à tort et à travers.

G-10- Peut-il y avoir des avalanches dans les gouffres ? Quand les glaçons tombent-ils ?

Les avalanches, comme à l'extérieur, surviennent après de fortes chutes de neige, alors que les glaçons tombent plutôt au moment des fortes chaleurs ou après une pluie.

G-11- Comment se forment les éboulis de gélifraction ?

La roche calcaire est plus ou moins fissurée. Ces fissures contiennent par capillarité toujours un peu d'eau. Si la cavité possède un courant d'air aspirant l'hiver, le gel peut pénétrer plusieurs dizaines, voire plusieurs centaines de mètres. L'eau en gelant se dilate et brise la roche. Les éboulis correspondants sont en général caractéristiques : les blocs en sont anguleux (réseau Sanguin et Boulevard de Seyssins à la Dent de Crolles).

G-12- Peut-il y avoir des réseaux à courant d'air dans les glaciers ?

Les glaciers sont fissurés, l'eau peut donc les parcourir, ouvrant, par fusion et non par dissolution chimique, des réseaux qui ressemblent aux réseaux karstiques. Des courants d'air peuvent donc s'y développer. Ces courants d'air de glacier jouent un rôle important dans l'agrandissement des réseaux, aussi important peut-être que l'eau (cf. tome 2, § 4.3.4.c).

H- Effets mécaniques, dioxyde de carbone et concrétions

H-1- Quelle force le vent exerce-t-il sur une concrétion ?

Le vent exerce sur un obstacle une force qu'on met en général sous la forme : $F = 0{,}5\ \rho\ U^2\ S\ C_x$.

Dans cette expression, ρ est la masse volumique de l'air (à peu près 1,2 $kg.m^{-3}$), U est la vitesse, S est la surface de l'obstacle face au vent (appelée maître couple et exprimée en m^2). Le coefficient de traînée C_x est un nombre qui dépend en général de la vitesse du vent et de la forme de l'obstacle et qui vaut de l'ordre de 0,5. Ainsi un vent de 1 m/s exerce sur une concrétion de 1 m de long et 5 cm de diamètre une force de l'ordre de 0,015 N, ce qui est faible.

H-2- Le courant d'air peut-il mettre en oscillation des concrétions ?

On donne l'exemple des Sabres de la Cañuela au § 1.9.1. La mise en oscillation d'une concrétion a lieu si la fréquence propre de la concrétion (d'autant plus grande qu'elle est plus grosse et d'autant plus petite qu'elle est plus longue et lourde) se trouve dans l'intervalle des fréquences naturelles engendrées par la turbulence.

H-3- Pourrait-on exploiter l'énergie éolienne du courant d'air ?

La théorie des aérogénérateurs montre que la puissance disponible dans un courant d'air de vitesse U et de section transversale S vaut $P = 8/27\ \rho\ S\ U^3$. Cette puissance est la puissance maximale récupérable sur une éolienne. Un courant d'air de 10 m/s fournirait ainsi une puissance de P = 355 W par mètre carré de surface balayée par le rotor.

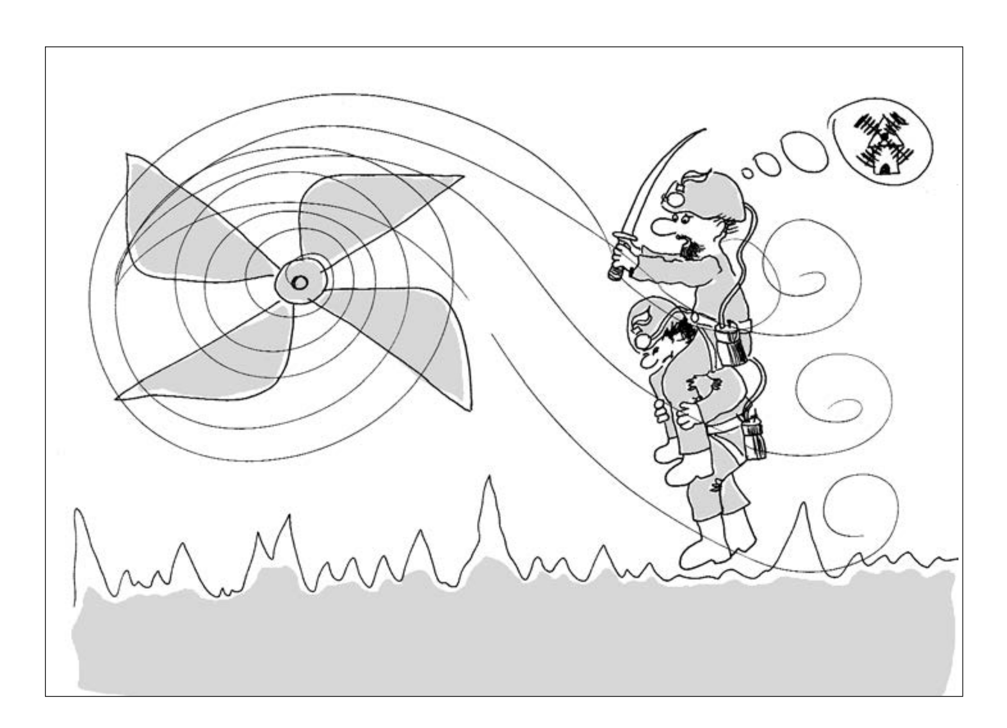


Fig. 2-41- L'exploitation généralisée de l'énergie éolienne des cavernes n'est pas pour demain
(dessin de Régine Landry)

Is Don Quichotte capable of exploiting the energy of cave wind ?

Il existe en Chine une éolienne installée à l'entrée de la grotte «Ghost Wind cave» ou grotte du Vent des Esprits sur le karst de Longshan dans la province de Hunan, 300 km au sud-ouest du célèbre barrage des Trois Gorges sur le Yangtse. Le porche se présente comme une entrée circulaire d'un peu plus de 1,6 m de diamètre. Aussitôt derrière, la galerie a de grandes dimensions. Le porche voit passer toute l'année un fort courant d'air. En hiver, il est entrant et sa vitesse atteint 15 m/s. En été, il sort à la température de 18°C et sa vitesse atteint 18 m/s soit un débit de l'ordre de 35 m^3/s. Le propriétaire d'un hôtel voisin eut l'idée d'installer cette éolienne en 1993. Le rotor fait 1,6 m de diamètre et la puissance maximale récupérable est donc de 5,3 kW. La génératrice installée à l'arrière de l'éolienne peut délivrer jusqu'à 3 kW largement suffisante pour la consommation de l'hôtel et l'alimentation des postes de télévision.

D'après un article communiqué par J.-P. Barbary, de Dake et al.

H-4- Comment expliquer les traces allongées dans le sens de la galerie dans certaines grottes ?

Ces traces allongées sont dues aux impacts de gouttes tombant sur le sol et plus ou moins entraînées par le courant d'air. Ces traces sont toujours allongées dans le sens de la galerie et du courant d'air. Comme le courant d'air des tubes à vent est alternatif, on s'attend à ce que le déplacement par rapport à la verticale soit tantôt dans un sens, tantôt dans l'autre suivant la saison (cf. § 1.9.5).

H-5- Qu'appelle-t-on trous de stillation ?

Ce sont les trous engendrés par les gouttes tombant du plafond sur des sédiments meubles comme l'argile. Une fossilisation ultérieure à l'aide d'un léger concrétionnement peut figer ces trous pour longtemps.

H-6- Comment pourrait-on savoir qu'un réseau, dépourvu de courant d'air, en a possédé un par le passé ?

Par les empreintes laissées par le courant d'air sur les concrétions ou sur les trous de stillation.

H-7- Comment pourrait-on «mesurer» la vitesse de courants d'air fossiles ?

Dans le principe, la mesure du déplacement du point d'impact de gouttes entraînées par un courant d'air permet de remonter à une vitesse moyenne de ce courant d'air, même si une obstruction a supprimé tout courant d'air depuis des milliers d'années. D'une manière curieuse, cette déviation permettrait, connaissant les dénivellations dans le réseau, de remonter aux fluctuations des températures des paléoclimats dont le repérage en temps pourrait être trouvé par datation des concrétions au-dessus de la marque observée (cf. Lismonde 1991-b).

H-8- La composition de l'air est-elle la même dans une cavité et à l'extérieur ?

On peut dire en première approximation que la composition de l'air est la même dans les grottes et à l'extérieur surtout si un courant d'air renouvelle cet air. La différence de composition porte essentiellement sur la présence en quantité plus importante de dioxyde de carbone dans les cavités qu'à l'extérieur. Dans le cas où ce dioxyde de carbone a été produit par une oxydation, il remplace un pourcentage équivalent d'oxygène. Dans le cas d'un dégazage de l'eau arrivant dans une galerie plus ou moins ventilée, le dioxyde de carbone ne modifie pas le rapport pressions partielles oxygène/azote.

H-9- Qu'appelle-t-on pression de CO_2 équilibrante ?

L'eau contient du dioxyde de carbone dissous. Si de l'air coexistait au-dessus de l'eau et se trouvait en équilibre avec lui, on aurait une certaine pression partielle de dioxyde de carbone dans l'air. On l'appelle pression de CO_2 équilibrante. C'est la pression partielle de l'air qui assure une certaine quantité de CO_2 dans l'eau.

H-10- Pourquoi certaines cavités présentent-elles du dioxyde de carbone ?

Le dioxyde de carbone présent dans l'air libre a une pression partielle de l'ordre de $3{,}5.10^{-4}$ bar. Dans les grottes, on rencontre de l'air avec une pression partielle de dioxyde de carbone qui peut dépasser cinq pour cent. Ce dioxyde de carbone est supposé provenir des réactions organiques des sols qui chargent l'eau de percolation en dioxyde de carbone. Le dioxyde de carbone de l'air se met en équilibre avec celui de l'eau (pression de CO_2 équilibrante). D'autres causes peuvent aussi coexister telles que l'augmentation momentanée de la pression de l'air entraînant une dissolution du dioxyde de carbone dans l'eau, l'apport de dioxyde de carbone par décomposition de matière organique entraînée par l'eau, la sortie de CO_2 d'origine profonde …

H-11- Existe t-il des trous souffleurs de dioxyde de carbone ?

En Ardèche, près de la grotte d'Orgnac, existe un trou soufflant un air chargé de dioxyde de carbone (cf. § 1.11.1). L'existence de trous soufflant de tels débits de dioxyde de carbone à 5% semble, à certains, contradictoire avec une origine biologique. Ils parlent alors de remontées de gaz profond (volcanisme ?) mais l'hypothèse biologique semble, à d'autres, parfaitement justifier ces concentrations.

H-12- Où trouve-t-on des émergences de dioxyde de carbone ?

Ces trous souffleurs jouent le rôle d'émergence de dioxyde de carbone qui a de la peine à se mélanger avec le reste de l'atmosphère et forme donc des écoulements d'air chargé en gaz. En Islande, un gouffre n'a pu être totalement exploré à cause de la concentration en dioxyde de carbone. Mais dans ce cas, l'origine volcanique est certaine.

H-13- Le dioxyde de carbone peut-il se décanter ?

Le mot décantation signifie séparation de deux milieux. L'argile décante dans l'eau lentement, c'est-à-dire que les particules d'argile se séparent de l'eau en tombant au fond du récipient. Le dioxyde de carbone est un gaz comme l'air. Les molécules sont très petites. L'action différentielle de la pesanteur est contrecarrée par l'agitation thermique. Il faudrait une hauteur de plusieurs kilomètres pour commencer à voir un effet. Jacques Choppy utilise le mot décantation pour décrire l'accumulation de dioxyde de carbone au bas des réseaux par courant de gravité. Il n'y a pas séparation des gaz. Il y a simplement courant de gravité et absence de mélange. Le mot est malheureux car il prête à confusion.

Trombe dans son traité (1952, p. 109) aborde cette idée qui est due à Martel et écarte justement cette hypothèse.

H-14- La concentration de dioxyde de carbone varie-t-elle pendant la respiration des cavités ?

La mise en mouvement de l'air entraîne celle du dioxyde de carbone.

H-15- Comment se fait la dilution le long d'un courant d'air, d'un gaz toxique généré instantanément ?

Cette question importante rejoint la question du devenir d'un traceur dans un écoulement (cf. tome 2, § 2.3.5). Des recherches ont été entreprises sur ce sujet (cf. Jeannin 1995), mais tout reste à faire ou presque ! (cf. § 3.3.6)

H-16- Comment dans une cavité à une seule entrée, l'air peut-il se renouveler ?

Dans une cavité à une seule entrée, l'air ne se renouvelle pas par le processus de diffusion moléculaire. Cet effet est bien trop lent pour être sensible. Plusieurs mécanismes permettent de renouveler l'air. La présence d'une circulation d'eau permet un renouvellement par dissolution d'une certaine quantité d'air et dégazage un peu plus loin (cf. question J-18).

Les autres mécanismes sont plus faciles à comprendre. Il s'agit du pompage alternatif de l'air par les fluctuations de la pression extérieure et du niveau piézométrique (respiration des cavernes) et aussi de l'apport d'air par l'infiltration de l'eau au moment des averses. Cette question est étudiée en détail dans le tome 2 au § 4.3.5.

H-17- Pourquoi l'eau qui traverse un sol se charge-t-elle en dioxyde de carbone dissous ?

L'activité biologique des plantes consiste à capter le dioxyde de carbone de l'air pour en récupérer le carbone. Le métabolisme de la plante conduit à oxyder ces matières carbonées, d'où une libération de dioxyde de carbone sous une forme concentrée au niveau des racines. Ce dioxyde de carbone passe en solution dans l'eau par un processus de diffusion (loi de Henry). Cette question est reprise dans le tome 2, § 4.5.1.

H-18- Quelle est la quantité de dioxyde de carbone dissous dans l'eau quand on connaît celle de l'air ?

À une température donnée, et une fois l'équilibre atteint, la quantité de dioxyde de carbone dissous dans l'eau ne dépend que de celle contenue dans l'air et lui est proportionnelle.

H-19- Qu'est-ce que la loi de Henry ?

La quantité de dioxyde de carbone que peut dissoudre l'eau (boissons gazeuse) est proportionnelle à la quantité de dioxyde de carbone dans l'air (pression partielle). La loi de Henry fixe cette proportion. Elle sera étudiée au tome 2, § 1.6.1.

H-20- Quelles sont les raisons qui expliquent la présence de concrétions dans certaines galeries ?

L'eau, chargée en dioxyde de carbone à la traversée du sol, a dissous du calcaire puis elle débouche dans une galerie ventilée. La mise en équilibre avec l'air peu chargé en dioxyde de carbone conduit à un dégazage du dioxyde de carbone et donc à un déplacement de l'équilibre chimique qui dépose le calcaire en excès si la saturation était presque atteinte.
Un autre facteur est la température. Un réchauffement d'une eau saturée en bicarbonate s'accompagne d'un léger dépôt.

H-21- Pourquoi trouve-t-on des gours étagés (escalier de gours) à la confluence de certains affluents ?

Un affluent qui n'a eu que peu de contact avec l'air atmosphérique a pu se charger fortement de calcaire dissous. Sa pression de CO_2 équilibrant peut être élevée. Son arrivée dans un conduit ventilé, oblige l'eau à dégazer et le déplacement de l'équilibre chimique s'accompagne d'un dépôt de calcite à la surface de l'eau. Cette pellicule est poussée par le courant et vient s'agglutiner sur les petits barrages qu'elle contribue à construire. Ces petits barrages forment les gours qui ressemblent aux murettes des rizières du sud-est asiatique. L'étude des paramètres qui conditionnent la taille de ces gours reste à faire. Il semble que la taille des gours augmente quand le débit augmente. On trouve des gours de toutes dimensions depuis les micro-gours de taille centimétrique jusqu'aux gours de plusieurs mètres que le spéléo doit franchir à la nage (grotte de Chauveroche, gouffre Berger…). La hauteur des barrages est liée, quant à elle, à l'âge des gours et à la concentration de CO_2 de l'eau. On trouve des barrages de plusieurs mètres de haut (grotte Chevaline en Vercors, Saint Marcel d'Ardèche …).

H-22- Pourquoi certaines émergences construisent-elles des cascades de tuf (sources pétrifiantes) ?

L'eau de ces résurgences a une pression partielle de CO_2 équilibrante supérieure à celle de l'atmosphère et le dégazage s'accompagne d'un concrétionnement. Mais, il n'est pas certain que cette explication suffise à elle seule car une activité biologique semble associée à ces constructions. Philippe Renault (exposé au congrès à Oyonnax) pense que ces tufs sont à mettre en relation avec le type de végétation des bassins d'alimentations de la résurgence, les chênes étant plus actifs que les résineux.

H-23- Pourquoi certaines concrétions sont profilées dans le courant d'air ?

Le courant d'air profile les concrétions. Elles prennent alors une section allongée dans le sens du courant d'air (cf. dessins § 1.9.1).

H-24- À quoi est due l'inclinaison de certaines concrétions ?

De la même façon, le courant d'air peut perturber la croissance des concrétions, provoquant une inclinaison dans une certaine direction (cf. photo d'anémolithe sur la couverture).

H-25- Les excentriques peuvent-elles croître dans un courant d'air ?

Traditionnellement les excentriques sont supposées croître en atmosphère calme. Mais la galerie des excentriques à la Diau succède pourtant à la Soufflerie.

H-26- Le mondmilch des parois a-t-il besoin de courant d'air pour se former ?

Le mondmilch se trouve dans des grottes ventilées, à faiblement ventilées. Par exemple au Mort Ru, au plafond de la grotte de la Ture … Mais on en trouve aussi dans des cavités sans courant d'air apparent.

H-27- Où trouve-t-on souvent des dépôts de gypse ?

On constate que le gypse se dépose sous forme de croûtes ou de fleurs préférentiellement sur des parois de calcaires marneux bien sèches en présence d'un courant d'air. Les grandes grottes des Monts Cantabriques sont typiques à ce point de vue.

Questions plus techniques ou scientifiques ?

I- Effet des forces aérodynamiques

I-1- Qu'est ce qu'un écoulement laminaire, turbulent ?

Un écoulement laminaire se fait à lignes de courant parallèles, un peu comme des algues laminaires disposées dans un courant. La vitesse en un point a une valeur et une direction fixes. Les écoulements très lents sont toujours laminaires. Mais les courants d'air souterrains sont le plus souvent turbulents, c'est-à-dire que la vitesse en un point fluctue rapidement, en valeur et en direction, et que des tourbillons sont générés au sein de l'écoulement.

I-2- Pour quelles caractéristiques de l'écoulement se fait la transition ?

En augmentant progressivement la vitesse dans un tuyau, on observe le passage d'un régime laminaire à un régime turbulent par apparition d'instabilités hydrodynamiques dans l'écoulement (paquets turbulents). Une fois que l'écoulement est devenu turbulent, et même si on diminue faiblement la vitesse, il reste turbulent. Il existe donc une certaine hystérésis du phénomène. La transition dans un tuyau rugueux comme les galeries doit se faire pour un nombre de Reynolds voisin de 1000 ($Re = UD/\nu$, U est la vitesse au loin, D est la largeur de la galerie, ν est la viscosité cinématique de l'air qui vaut 15.10^{-6} m^2/s).

L'écoulement turbulent qui aborde un obstacle génère une couche limite cinématique au contact de l'obstacle. Au voisinage du bord d'attaque, la couche limite est souvent laminaire (prépondérance des forces de frottement visqueux). En s'éloignant du bord d'attaque, la couche limite s'épaissit et les forces visqueuses diminuent, la couche limite devient alors turbulente (pour un nombre de Reynolds $Re = U L/\nu$ de l'ordre de 10^5, U est la vitesse au loin, L est la distance au bord d'attaque, ν est la viscosité cinématique de l'air = 15.10^{-6} m^2/s).

I-3- Les courants d'air dans les cavités sont-ils laminaires ou turbulents ?

Le nombre de Reynolds de la transition de l'ordre de 1000, nous permet de prévoir que dans une galerie de 2 mètres de diamètre, l'écoulement sera turbulent si la vitesse dépasse 8 mm/s, c'est-à-dire si le débit dépasse 25 l/s. On voit donc que les courants d'air sensibles seront turbulents. Dans une grande galerie de 10 mètres de diamètre, le courant d'air sera turbulent si la vitesse dépasse 1,5 mm/s, c'est-à-dire si le débit dépasse 120 litres par seconde.

On peut tracer un diagramme représentant la séparation entre les deux régimes en fonction du débit et du diamètre équivalent de la galerie (cf. figure ci-contre).

On en conclut que dans les réseaux de montagne ventilés, le courant d'air dans les parties resserrées est turbulent. En revanche, dans des réseaux de plaine, avec des débits de courant d'air faibles, l'écoulement pourra être laminaire.

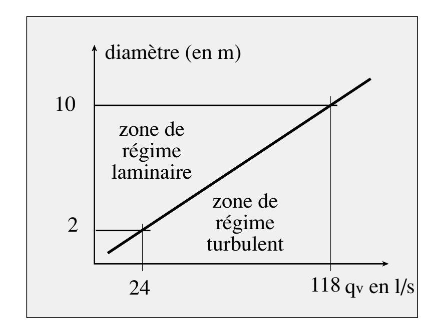


Fig. 2-42- Les deux régimes d'écoulement en fonction du diamètre

Flows versus duct diameter : laminar and turbulent regions

I-4- Quelles sont les forces qui freinent le courant d'air ?

Ce sont les forces de frottement visqueux ou encore un gradient de pression positif. Le gradient de pression permet au courant d'air d'adapter sa vitesse à la section de la galerie qui s'offre à lui. À grandes sections, faibles vitesses et réciproquement. C'est le gradient de pression qui permet l'accélération de l'air à l'entrée du resserrement (cf. aussi la question I-13).

I-5- Qu'est-ce que la dissipation visqueuse ?

La dissipation visqueuse est le nom qui désigne dans un courant d'air (ou un écoulement en général) la transformation d'énergie mécanique en chaleur par l'intermédiaire des forces de viscosités.

I-6- Qu'appelle-t-on perte de charge ?

La perte de charge est l'autre façon de voir cette transformation. La viscosité provoque une chute de pression dans l'écoulement (la pression n'est pas une énergie mais le travail dépensé par les forces de pression est converti en chaleur).

I-7- Qu'est-ce qu'une perte de charge régulière ?

Même dans un tuyau lisse, la viscosité freine le fluide. La charge du fluide diminue régulièrement le long du conduit. On trouvera dans le tome 2, § 1.3.4 différentes expressions plus ou moins utilisables.

I-8- Qu'appelle-t-on rugosité équivalente d'une paroi ?

Si le tuyau est rugueux, le freinage est encore plus efficace. On appelle rugosité équivalente la hauteur de rugosités standardisées qui fournissent la même perte de charge que les rugosités particulières du conduit.

I-9- Qu'est-ce qu'une perte de charge singulière ?

On appelle singularité géométrique dans une conduit tout ce qui modifie la direction ou le diamètre de la conduite. Ce sera par exemple un élargissement ou un rétrécissement brusque. Ce sera aussi un coude ou un changement de direction de la conduite. Ces modifications de la géométrie du conduit amènent des pertes de charges supplémentaires qui s'intègrent dans l'expression de la résistance aéraulique.

I-10- Qu'appelle-t-on résistance aéraulique d'une galerie ?

La perte de charge totale dans une galerie en écoulement turbulent est reliée au débit volumique par une relation du genre

$$\Delta p = R\, q_m^2$$

dans laquelle Δp est la perte de charge, q_m est le débit massique (en kg/s) et R est la résistance aéraulique (en $kg^{-1}.m^{-1}$). Simode (1976) a proposé d'appeler Kem l'unité de résistance. Dans le système d'unité CGS, l'unité était appelée le Murgue. Un Kem vaut 10^5 Murgue et 1 $kg^{-1}.m^{-1}$.

I-11- Que vaut la résistance aéraulique de plusieurs galeries en série ?

Quand plusieurs galeries se succèdent sur le trajet d'un même courant d'air sans qu'il y ait de fuites dans des galeries latérales, la résistance aéraulique totale est la somme des résistances aérauliques partielles.

I-12- Comment calculer la résistance aéraulique de plusieurs galeries en parallèle ?

Quand deux points du parcours d'un courant d'air sont connectés par un certains nombres de galeries (dites en parallèle), la résistance aéraulique équivalente se calcule par la relation :

$$\frac{1}{\sqrt{R_{\text{équiv.}}}} = \sum_i \frac{1}{\sqrt{R_i}}$$

La lettre grecque sigma signifie qu'on fait la somme pour chaque résistance partielle R_i.

Pour démontrer cette relation, il suffit de considérer que le débit total est la somme des débits partiels, et que la perte de charge est la même sur chaque tronçon (cf. tome 2, § 1.3.5).

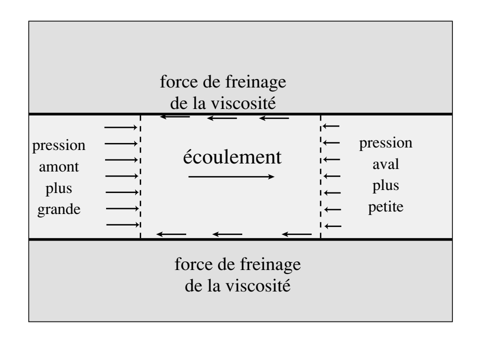


Fig. 2-43- Les forces qui maintiennent un écoulement : gradient de pression et freinage à la paroi

The two forces which maintain air flow : pressure gradient and stress at the walls

I-13- Qu'est-ce qu'un gradient de pression ?

Les forces de freinages sont compensées par l'effet d'aspiration du fluide causé par la diminution de la pression devant le fluide. On appelle gradient de pression un vecteur dont la direction est celle de la plus grande variation de la pression (cf. notion de direction de la plus grande pente sur une surface) et dont la longueur est d'autant plus grande que la variation de la pression est plus grande.

I-14- Qu'est-ce que la pression motrice, le gradient de pression motrice ?

C'est un terme technique qui désigne un concept bien adapté aux écoulements de l'eau. Dans l'eau en effet, même en l'absence de mouvement, la pression augmente quand on s'enfonce à cause de la pesanteur. On rajoute donc à la pression un terme qui compense exactement cette augmentation de pression. Cet ensemble de deux termes $P + \rho g h$ s'appelle pression motrice. De sorte qu'en statique, en absence de mouvement, on peut écrire que la pression motrice est constante partout. Si la pression motrice n'est pas constante partout, ce déséquilibre traduit le mouvement. On dira donc que le mouvement dans un fluide est lié aux gradients (variations orientées dans l'espace) de la pression motrice.

I-15- Quelle est la répartition des pressions en fonction de l'altitude ?

Dans l'eau la pression diminue régulièrement de 1 bar = 10^5 Pa tous les 9,81 mètres. Dans l'air, la pression diminue d'environ 120 Pa pour 10 m. Cette diminution dépend en réalité de la pression et de la loi de variation de la température en fonction de l'altitude. C'est pour cette raison que les météorologues envoyaient dans l'atmosphère des ballons sondes enregistreurs de la température.

I-16- Quelle est l'influence du profil de température de l'atmosphère sur son profil de pression ?

Ce rôle est faible et peut être négligé pour de faibles dénivellations. Dans une atmosphère adiabatique (telle qu'une bulle d'air qui monte ou descend, change sa température, mais reste à la même température que celle de l'air avoisinant) la diminution de pression avec l'altitude est plus rapide que dans une atmosphère isotherme (cf. tome 2, § 1.2.2 et 1.2.4).

I-17- Quel est le mécanisme global à l'origine du courant d'air d'un tube à vent ?

Le courant d'air résulte de la différence de poids de deux colonnes d'air, l'une prise à l'intérieur de la grotte et l'autre prise à l'extérieur de la grotte. Cet écart de poids résulte d'un écart de masse volumique. Cet écart de masse volumique lui-même provient de plusieurs causes possibles dont les effets peuvent s'ajouter ou se retrancher, écart de température, différence de composition (vapeur d'eau, dioxyde de carbone…).

I-18- Quel principe physique traduit l'équation de Bernoulli ?

L'équation de Bernoulli traduit le théorème de l'énergie cinétique, c'est-à-dire la propriété que la variation de l'énergie cinétique d'une particule d'air est due au travail des forces extérieures et des forces intérieures (cf. tome 2, § 1.3.3).

I-19- Qu'est-ce que l'effet Venturi pour un courant d'air ?

L'effet Venturi est le fait que la pression dans un rétrécissement est plus petite qu'ailleurs, d'où des applications pour une aspiration (comme l'effet trompe). La perte de charge due à un diaphragme est de l'ordre de $0,5\ \rho\ V^2$. Dans un Venturi, elle est un peu plus faible, ce qui permet de dire que la vitesse maximale qu'on peut observer dans une cavité sera un peu plus grande dans un Venturi bien profilé que dans un resserrement de forme quelconque.

I-20- Sous l'action de quelles forces motrices locales, le courant d'air se maintient-il ?

Localement, ce sont les forces de pression qui assurent le mouvement et l'empêchent d'être stoppé par la viscosité à la paroi.

I-21- Peut-on calculer en trois lignes la vitesse du vent dans un tunnel de dimensions connues ?

Oui, si on connaît la dénivellation h entre les deux entrées et les différences de température ΔT entre l'air intérieur et l'air extérieur. La différence de pression motrice fournie par cet écart de température est la différence de poids des deux colonnes d'air $\Delta\rho\ g\ h$. Il faut faire une hypothèse sur la perte de charge principale. On supposera par exemple l'existence d'un rétrécissement dans le tunnel. Pour ce rétrécissement, une bonne approximation de la perte de charge est donnée par la valeur $0{,}5\ \rho\ U^2$. D'où la vitesse maximale observable :

$$\rho\, g\, \frac{\Delta T}{T}\, h = \frac{1}{2}\, \rho\, U^2 \Rightarrow U = \sqrt{2\, g\, h\, \frac{\Delta T}{T}}$$

avec U en m/s, g = 9,81 m/s², h en m, et T en K.

I-22- Peut-on trouver la caractéristique U = f(Text) à partir d'une seule mesure ?

Une mesure de la vitesse U_0 pour une température de l'air extérieur T_0 peut fournir une expression générale de la vitesse. Il suffit de connaître ou d'estimer la température profonde du réseau T_m. On écrira alors une relation approchée de la forme :

$$V = V_0 \sqrt{\frac{T_{ext} - T_m}{T_0 - T_m}}$$

On verra en détail dans le tome 2 (§ 3.3) que cette relation ne peut pas traduire les effets d'hystérésis propres aux courants d'air. Mais elle pourra rendre des services.

I-23- Pour quelles conditions précises, un courant d'air s'inverse-t-il ?

Quand la différence de poids des deux colonnes change de signe, le courant d'air s'inverse. Le poids est directement lié à la masse volumique. Donc on peut dire que le courant d'air s'inverse quand la masse volumique moyennée sur z de l'air intérieur est égale à la masse volumique moyennée sur z de l'air extérieur.

Si on néglige la contribution de l'humidité et du CO_2 à la masse volumique de l'air, on peut dire d'une manière approchée que l'inversion de courant d'air se produit quand la température moyennée sur z est égale à l'intérieur et à l'extérieur.

Si le réseau est un grand réseau tel qu'il existe une température profonde constante toute l'année et si de plus la dénivellation entre les orifices du tube à vent se situe entièrement dans la zone profonde, alors l'inversion du courant d'air se produit quand la température extérieure se trouve égale à la température profonde du massif.

I-24- Qu'appelle-t-on débit masse, débit de quantité de mouvement, débit d'énergie ou d'enthalpie ?

Un débit masse, ou débit massique, est la masse de la matière qui traverse une certaine surface par unité de temps. Un débit masse est donc, en dimension une masse divisée par un temps. De même on peut construire des débits de quantité de mouvement, d'énergie, d'enthalpie qui sont respectivement une quantité de mouvement (kg.m/s) divisée par un temps, une énergie (J) divisée par un temps, une enthalpie (J) divisée par un temps. L'interprétation physique de ces notions est très simple, il s'agit de la quantité de mouvement, d'énergie, d'enthalpie qui traverse par seconde une surface donnée. On voit que des débits d'énergie ou d'enthalpie sont exprimés en watts. On peut mettre en relation cette notion avec celle de flux.

I-25- Dans un jet d'air débouchant dans une salle, que valent les différents débits ?

Un air qui sort d'un conduit et débouche dans un grand volume voit sa vitesse diminuer progressivement avec la distance à la bouche et voit sa dimension transversale augmenter par viscosité et entraînement turbulent.

On montre que dans un jet, le débit de quantité de mouvement se conserve en s'éloignant de la bouche, que le débit masse augmente régulièrement par le phénomène d'éjection et que le débit d'énergie cinétique diminue par transformation d'énergie cinétique en chaleur (dissipation).

I-26- Qu'est-ce qu'on appelle éjection ?

L'éjection est le phénomène d'entraînement de l'air par un jet d'air. Il existe déjà pour un jet débouchant dans un grand volume comme on l'a vu plus haut (cf. question A-33). Mais il sera beaucoup plus important pour des dispositions géométriques particulières.

Dans l'exemple de la figure, il y a un courant d'air dans la galerie A et il n'y aurait pas de courant d'air dans la galerie B en l'absence de courant d'air en A. Le processus physique de l'éjection est l'emprisonnement au sein des tourbillons qui apparaissent à la limite du jet A (ligne pointillée) de poches d'air moins rapides qui se trouvent accélérées, ce qui bien entendu freine les tourbillons mais augmente le débit. La vitesse importante V tire en quelque sorte le fluide de la galerie B, et ainsi, après la rencontre des deux débits, le débit sortant est plus grand que le simple débit de A. Cet effet d'éjection est utilisé pour éviter, dans une installation industrielle, d'installer un ventilateur ou une pompe dans le conduit B pour amorcer un écoulement. On parle d'aéro-éjecteur pour des écoulements d'air et d'hydro-éjecteur pour des écoulements d'eau.

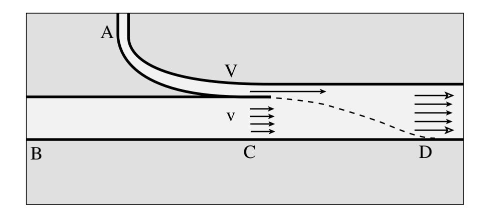


Fig. 2-44- Phénomène d'éjection (entraînement de l'air par un jet)

Air dragged along by air-jet

I-27- Peut-on trouver des aéro-éjecteurs naturels ?

Il doit en exister beaucoup, mais le spéléo se contente d'observer qu'il y a un courant d'air dans la galerie B sans pouvoir démêler les causes de ce courant d'air.

I-28- Qu'est-ce que le blocage sonique ?

Le blocage sonique est l'insensibilité d'un écoulement gazeux à la variation des conditions aux limites aval lorsque la vitesse du son est atteinte en un point de l'écoulement. Cette propriété se traduit aussi de la façon suivante. La vitesse de propagation des perturbations de pression faibles est la vitesse du son. L'information venant de l'aval ne peut pas remonter à contre-courant si l'écoulement va lui-même à la vitesse du son.

I-29- Est-ce que le blocage sonique se manifeste en écoulement diphasique eau-air ?

Oui, et on montre que dans un mélange diphasique homogène, la vitesse du son peut descendre à quelques m/s .

I-30- L'écoulement d'un fleuve d'air froid est-il du type rivière ou torrent ?

Dans une rivière, la vitesse du courant est inférieure à la célérité des ondes de gravité. Dans un torrent au contraire, la vitesse est supérieure à la célérité c des ondes de gravité.

$$c = \sqrt{g\,h}$$ g accélération de la pesanteur, h profondeur de l'eau

Ces ondes de gravité sont les vitesses de propagation d'une perturbation dans l'écoulement. Pour savoir si un cours d'eau est une rivière ou un torrent, il suffit de lancer un caillou dans l'eau et regarder si la perturbation peut remonter vers l'amont.

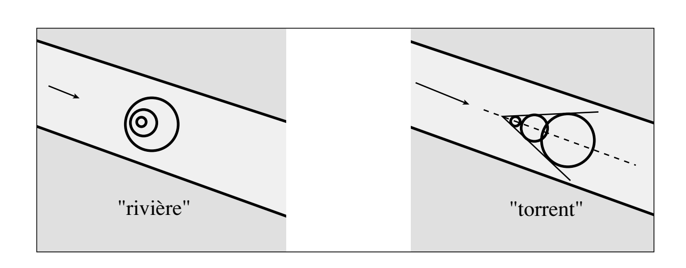


Fig. 2-45- Écoulements de rivière et de torrent vus en plan

Undercritical and supercritical flows for free surface water (river and torrent flow)

De même, les écoulements de gravité, ou courants de densité, sont le siège d'ondes, qu'on appelle alors ondes d'interface, et dont la célérité est donnée par la relation :

$$c = \sqrt{\frac{\Delta\rho}{\rho} g\, h}$$

L'écart de masse volumique est relié à l'écart de température $\frac{\Delta\rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T}$

La température T est exprimée en K. Par exemple, dans le cas d'un écoulement de gravité d'une température de 3°C inférieure à l'air ambiant et d'épaisseur 3 m, la vitesse des ondes d'interface est c = 0,55 m/s. Elle est très faible. Si la vitesse de l'air est supérieure à cette vitesse, l'écoulement est du style torrentiel. On dira plutôt super-critique. L'observation faite à la Cañuela est de ce type (cf. § 1.5.2).

I-31- Existe-t-il des ressauts aérauliques ?

Le ressaut hydraulique est le phénomène fortement dissipatif qui survient quand un écoulement torrentiel se raccorde à un écoulement de rivière. Il s'observe magnifiquement quand un torrent canalisé sur un radier en béton se jette dans un plan d'eau. De la même façon, dans un courant de densité il est possible d'observer des ressauts aérauliques. La miscibilité de l'air froid dans l'air chaud diminuera fortement la violence du phénomène.

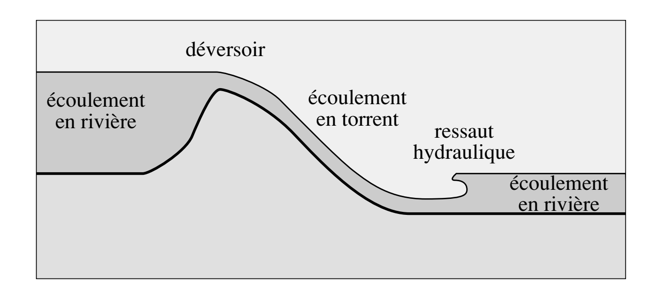


Fig. 2-46- Déversoir d'eau et ressaut hydraulique

Overflow and hydraulic jump

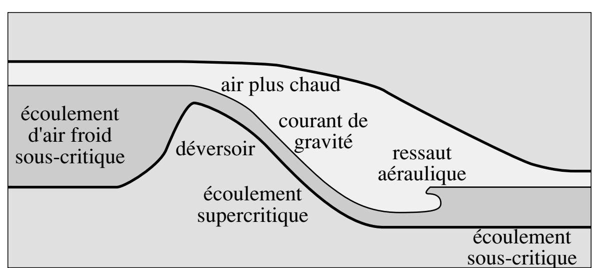


Fig. 2-47- Déversoir d'air dense et ressaut aéraulique

Air overflow and aeraulic jump in stratified flow

I-32- Qu'appelle-t-on nombre de Mach pour un écoulement ?

Du nom du mécanicien et philosophe autrichien Ernst Mach. C'est un nombre sans dimension caractérisant la vitesse en un point. C'est le rapport entre la vitesse de l'air en ce point et la vitesse du son au même point. Si le nombre de Mach est plus petit que 1, on dit que l'écoulement est subsonique. Si le nombre de Mach est égal à 1, l'écoulement est sonique. Si le nombre de Mach est supérieur à 1, l'écoulement est dit supersonique. En écoulement supersonique, il peut apparaître des ondes de choc dans l'écoulement.

I-33- Peut-il exister des courants d'air souterrains supersoniques ?

Oui, absolument ! mais ils sont d'une grande rareté car ils ne peuvent arriver qu'au moment des grandes crues. On cite § 1.8.5 l'exemple du Souffleur de Saint Christol pour lequel un courant d'air supersonique a peut-être existé.

On peut en effet imaginer que les écoulements induits par la montée des eaux puissent devenir supersoniques (le sifflement des jets supersoniques est dû aux ondes de choc ou détente associées). Il est facile de trouver un modèle fournissant de telles vitesses. Un petit calcul montre que l'écoulement au niveau de l'étranglement (col) sera sonique si la pression de l'air comprimé est 1,9 fois la pression en aval. Cette surpression sera obtenue si le volume de la chambre est divisé par deux rapidement (c'est-à-dire en un temps plus court que le temps de vidange par la tuyère improvisée). En aval de l'étranglement, l'écoulement sera supersonique d'autant plus que la pression est grande, des ondes de choc de recompression ou de détente apparaîtront avec leur sifflement caractéristique.

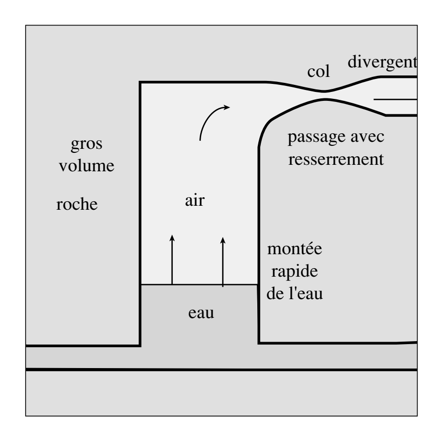


Fig. 2-48- Configuration pour un jet supersonique.
La remontée de l'eau joue le rôle d'un piston qui met l'air en pression.
La sortie du puits en forme de tuyère convergente-divergente offre une possibilité d'obtenir un écoulement supersonique

A possible pattern for supersonic flow

On peut trouver un ordre de grandeur des débits d'air au moment de l'épisode de 1935. Le jet suffisait à soutenir un béret, c'est-à-dire exerçait une force de l'ordre de quelques newtons (disons 6 N). La vitesse devait être de l'ordre de 300 m/s, ce qui fournit un débit masse de 20 g/s, soit environ 20 l/s. Ce débit est très faible. Il permet au bout des 4 heures qu'a duré le phénomène un passage de l'ordre de 300 kg d'air. Au bout d'une journée, cela représente un volume de 1,7 milliers de mètres cubes. Le volume des vides connus au Souffleur peut être estimé quant-à-lui à plus de 1,2 millions de mètres cubes. On voit que la vidange de l'air est négligeable. Tout se passe au niveau d'une mise en charge rapide comme si la masse d'air est constante dans le réseau. Examinons maintenant le volume de l'eau correspondant aux mises en charge. Le débit à la fontaine de Vaucluse étant de 111 m^3/s (Guigue, 1949 p. 84), le volume correspondant en un jour est de 9,6 millions de m^3. La crue ayant été étalée dans le temps, c'est une quantité encore supérieure qui est arrivée dans le sous-sol ce jour-là, peut être 10 millions de m^3. Pour doubler la pression dans le Souffleur, il fallait deux conditions. La première est que le volume de l'air ait diminué de moitié. Ce qui représente un volume d'eau de 600 mille m^3 soit un volume égal à 1% du volume total mis en œuvre sur le bassin. Ce chiffre semble possible. La deuxième condition est que la remontée de l'eau ait été suffisante pour occuper un tel volume. Mais si on prend en compte le fait que c'est le réseau inférieur qui présente le plus grand volume, une remontée de l'eau de 100 m aurait largement suffit pour obtenir cette pression. Les crues observées dans le Souffleur dépassent 30 mètres. Il n'est pas impossible d'envisager des crues exceptionnelles qui atteignent 100 mètres.

Conclusion : des écoulements d'air supersoniques sont envisageables sous terre mais à l'occasion de phénomènes extraordinaires comme des crues centenales. Les effets de ces écoulements rapides doivent rester très modestes, à part le bruit qui peut alors devenir assourdissant.

On pourrait imaginer qu'une cascade tombant dans un puits très exigu et entraînant de l'air, pourrait engendrer dans un puits parallèle, avec une disposition géométrique favorable, un écoulement supersonique. Mais cette disposition est inexplorable, car il faudrait un puits arrosé infranchissable par les spéléos et un puits parallèle de retour petit et donc sans doute impénétrable pour justifier une telle vitesse.

Dans le même genre peu probable, on peut aussi imaginer le scénario catastrophe où une avalanche est avalée au bas d'une pente par un gouffre. La surpression pourrait engendrer momentanément un courant d'air supersonique (catastrophe au gouffre Gortani ?).

I-34- Quelle sorte de courant d'air engendre une explosion dans une grotte ?

Une explosion forte est en général une onde de détonation, c'est-à-dire que c'est l'onde de choc elle-même qui déclenche la réaction chimique dans l'explosif. Une explosion moins forte peut être une déflagration. Dans ce cas, c'est la réaction chimique qui gère la vitesse d'avancement du front de réaction. La vitesse est en général de plusieurs kilomètres par seconde. Une fois que l'onde de choc débouche dans l'atmosphère, les processus deviennent communs aux deux sortes d'explosion. L'onde de choc continue à progresser dans l'air à une vitesse plus élevée que le son. Derrière cette onde de choc, le fluide est poussé par l'expansion des gaz issus de l'explosion. L'onde de choc marque une discontinuité des pressions. Cette discontinuité en avançant dans l'atmosphère de la grotte s'atténue, d'une part, parce que la surface augmente, et d'autre part, parce que la vitesse de l'air derrière l'onde de choc diminue. Les ondes de choc, une fois qu'elles sont devenues assez faibles se transforment en ondes acoustiques qui se propagent à la vitesse du son.

Dans la partie onde de choc, les courants d'air peuvent être extrêmement violents, supersoniques en tout cas. Mais rapidement, ils se transforment en un simple mouvement de va-et-vient de l'air. Néanmoins, les lampes à acétylènes sont soufflées jusqu'à plusieurs dizaines de mètres de l'explosion.

Des phénomènes acoustiques complexes font que l'explosion s'entend plus ou moins loin et se trouve réverbérée plus ou moins longtemps.

I-35- Peut-on avoir des courants d'air intermittents analogues aux sources intermittentes ?

Certaines sources intermittentes sont liées aux marées terrestres. On pourrait donc observer ce genre d'oscillations. Mais la plupart des sources intermittentes sont dues à des phénomènes purement hydrauliques de vidange et d'amorçage de siphons. On peut imaginer que le dispositif qui crée l'alternance du débit crée aussi une alternance de courant d'air. Nous en présentons un modèle dans le dessin ci-joint par curiosité.

Un léger écoulement d'eau alimente le siphon. L'eau monte de A en B, le courant d'air s'arrête alors. L'eau continue de monter jusqu'au point C. Le siphon s'amorce alors et vide l'eau jusqu'à ce que le siphon se désamorce quand le niveau redescend au point A. Le courant d'air peut donc repartir. Dans ce cas le courant d'air intermittent est couplé à une source intermittente.

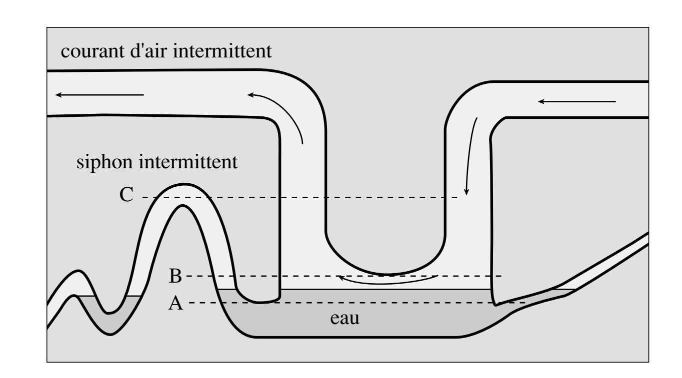


Fig. 2-49- Intermittence d'un courant d'air à cause d'un siphon d'eau intermittent

Intermittent air flow caused by an intermittent siphon

Il est facile d'imaginer une intermittence de l'air calquée sur celle des fontaines intermittentes. De l'air plus froid (ou plus chaud) emplit un réservoir puis un siphon s'amorce (en haut pour l'air froid ou en bas pour de l'air chaud) et le réservoir se vide rapidement. Cela conduit à un courant d'air à relaxation.

L'intermittence peut être due aussi à une instabilité dans l'itinéraire suivi par le courant d'air (bistable aéraulique), voire à une résonance à la Helmholtz.

I-36- La perte de charge occasionnée par une trémie est-elle la même quelque soit la granulométrie ?

Considérons par exemple une galerie obstruée par un effondrement de la voûte. Les dimensions de la galerie et de la trémie restant les mêmes, faisons varier la taille des blocs. Pour simplifier, supposons tous les blocs de la même taille. Il est facile alors de montrer que des blocs plus petits occasionnent une perte de charge plus grande. En effet, un empilement de blocs (en tas de la forme cubique centré) fournira toujours la même surface de passage au courant d'air. Simplement, celui-ci sera obligé de se diviser en un plus grand nombre de filets. Pour un débit restant constant, la vitesse restera constante dans les interstices. La perte de charge s'écrira :

$$\Delta p = 32\,\mu\,\frac{U\,L}{D^2}$$

L longueur du parcours, U vitesse et D dimension typique des blocs ou du passage entre les blocs.

On en déduit que la perte de charge dans ce cas est inversement proportionnelle au carré du diamètre des blocs, donc augmente quand la taille diminue.

Si la granulométrie est plus complexe, l'effet reste le même : une trémie à gros blocs laisse bien mieux passer le courant d'air qu'une trémie à petits blocs. Si de gros blocs coexistent avec des petits, il peut rester des vides non remplis par les petits entre les gros. On dira que la trémie est peu tassée si les vides sont donnés par la taille des gros blocs. En revanche une trémie bien tassée possède des vides dont la taille est celle des petits blocs. Par exemple, un siphon de sable arrête le courant d'air.

J- Effets thermiques

J-1- Comment varie la masse volumique de l'air ?

La masse volumique de l'air est le paramètre qui intervient dans le calcul de la pression motrice (avec la dénivellation et l'accélération de la pesanteur). Elle représente la masse d'un petit volume d'air rapporté à ce volume. Cette masse volumique augmente à peu près proportionnellement avec la pression et inversement proportionnellement avec la température Kelvin ($T = 275{,}15 + \theta$) (loi des gaz parfaits).

La présence d'autres gaz que l'air sec en modifie aussi la valeur. La vapeur d'eau la diminue, le dioxyde de carbone (dioxyde de carbone) l'augmente.

J-2- Quels rôles jouent les échanges thermiques dans un tube à vent ? La boucle de rétroaction.

Le poids de la colonne d'air intérieur dépend de la température de l'air qui évolue dans la grotte, au gré des échanges thermiques entre le courant d'air et les parois de la grotte (surtout près de l'entrée). La vitesse suit. Ce rôle est une rétroaction de l'effet du courant d'air sur lui-même, via les échanges de chaleur. On dit que la rétroaction est négative si la conséquence est de s'opposer au phénomène. Elle est dite positive si elle accentue le phénomène. Cet aspect positif et négatif s'apparente beaucoup à la stabilité et l'instabilité. Par exemple, les effets thermiques exercent une rétroaction négative dans un tube à vent simplement incliné. En revanche, les effets thermiques exercent une rétroaction positive dans un piège à air froid l'hiver, négative dans un piège à air froid l'été.

J-3- Existe-t-il une relation biunivoque entre température extérieure et débit de l'air ?

Pas du tout puisque la température intérieure a une certaine autonomie. On montrera plus loin qu'elle dépend essentiellement du passé de la température extérieure. Comme la relation réelle doit prendre en compte la distribution des températures intérieures, la relation est une relation «floue», c'est-à-dire que les points représentant des mesures se grouperaient dans un nuage et non sur une courbe.

J-4- Qu'est ce qu'on appelle effet de mémoire dans un phénomène physique (le courant d'air ici) ?

La température de l'air s'est imprimée en profondeur dans la roche calcaire. Plus tard, cette chaleur stockée pourra servir à réchauffer l'air qui passe. La température de l'air, au fur et à mesure qu'il progresse dans la cavité, dépend donc du stockage qui s'est fait dans un passé plus ou moins proche. La détermination de la température à un instant donné nécessite donc la connaissance des températures dans le passé. C'est un effet de mémoire. Un effet de mémoire en physique est toujours associé à une capacité de stockage (de matière, de quantité de mouvement ou d'énergie comme ici).

J-5- Dans quelle configuration, un réseau ne présente pas d'effet de mémoire pour le courant d'air ?

Cet effet de mémoire que joue la roche formant les parois des galeries ne pourra jouer un effet sur le courant d'air lui-même que s'il contribue au poids de la colonne d'air, c'est-à-dire, si la galerie présente une inclinaison marquée. En revanche, une galerie horizontale ne contribue pas. Il n'y a pas de rétroaction dans ce cas entre la thermique et la dynamique.

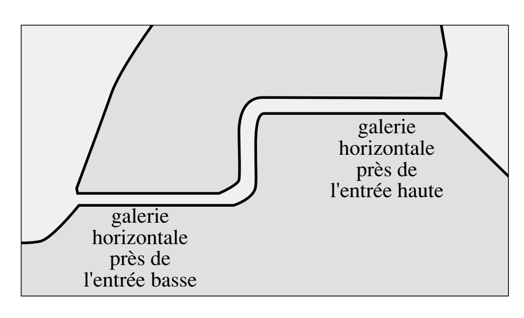


Fig. 2-50- Réseau avec absence de mémoire thermique

Karstic system without annual thermic memory

J-6- Configuration de réseau très sensible à l'effet de mémoire.

Un exemple caricatural est un réseau à deux entrées débutant aussi bien d'un côté que de l'autre par un tronçon vertical (le Trou qui Souffle de Méaudre répond à peu près à ce signalement). Les réseaux en forme de U en général.

J-7- Quelle rôle joue la convection naturelle dans un tube à vent ?

Dans un tube à vent, les galeries ne sont pas de simples tuyaux mais présentent des sections variables. Dans les sections élargies, les zones mortes participent aux échanges thermiques par l'intermédiaire de cellules convectives qui sont certes moins efficaces que les couches limites associées au courant d'air direct mais finissent par transmettre tout de même des énergies importantes.

J-8- Peut-on calculer l'évolution thermique dans une cavité ventilée ?

Oui, si on connaît finement la géométrie des conduits, si on est capable de prendre en compte (ou d'ignorer) le rôle de l'eau de percolation et si on connaît l'évolution dans le temps de la température extérieure. Cela fait beaucoup d'inconnues et à moins d'un gros travail sur ordinateur, il ne faut qu'espérer un modèle simpliste de la thermique de la grotte. L'étude en sera faite au tome 2, parties 2 et 3.

J-9- Peut-on prévoir la vitesse d'un courant d'air dans une cavité en tenant compte de l'effet mémoire ?

Pour prendre en compte l'effet de mémoire il faut disposer de la série des températures passées extérieures (au moins 6 mois), être capable de modéliser la conduction thermique dans les parois de la grotte et prendre en compte les écoulements d'eau. Là encore, un gros travail numérique sera à faire.

J-10- Combien faut-il d'énergie pour chauffer un kilogramme d'air (à peu près 1 m^3) de 1 °C ?

C'est la notion de capacité thermique massique à pression constante. Pour l'air, on a c_p =1 kJ.kg^{-1}.K^{-1} . L'énergie nécessaire est donc 1 kJ.

J-11- Combien faut-il d'énergie pour chauffer un kilogramme d'eau de 1°C ?

On a $Q = m\,c\,\Delta T$ soit, avec la capacité thermique massique de l'eau $c =$ 4,18 kJ.kg^{-1}.K^{-1} , une énergie de 4,18 kJ.

J-12- Quelle est l'énergie dépensée par une cascade qui tombe de 100 m ?

La pesanteur fournit une énergie $E = m\,g\,h$ soit 1 kJ par kg d'eau dévalant 100 mètres.

J-13- De combien augmente alors sa température, et quel est le processus de transformation ?

L'augmentation provient du travail des forces de pesanteur. L'augmentation de température est de 0,23 °C pour 100 m.

$$m\,g\,h = m\,c_p\,\Delta T \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta T}{h} = \frac{g}{c_p} = 0{,}235\ \text{°C/100 m}$$

Le processus est compliqué. La pesanteur exerce sa force accélératrice, l'impact au sol génère de très grands cisaillements dans lesquels la viscosité joue à plein et dissipe l'énergie en chaleur : on peut dire que la chaleur est produite par la dissipation de l'énergie en chaleur via la viscosité. Heureusement qu'un simple bilan général d'énergie permet d'évaluer l'augmentation de température car l'étude locale des phénomènes serait très compliquée.

On a vu plus haut que l'augmentation de température pour une chute de 100 m était équivalente à celle qu'apportait le flux géothermique pour une lame d'eau annuelle de précipitation de 2 mètres.

J-14- Quelle est l'énergie nécessaire pour évaporer un kilogramme d'eau ?

Elle est énorme, à peu près 2500 kJoules par kg d'eau évaporée. On peut se représenter son importance en la comparant à l'énergie pour monter un kilogramme d'eau de 0°C à 100°C et qui vaut 418 kJ seulement. C'est la chaleur latente de vaporisation.

J-15- Quelle est l'énergie nécessaire pour dégeler un kilogramme de glace ?

Elle est considérable elle-aussi : à peu près 335 kjoules par kg de glace.

J-16- À quoi sont dues les variations de la pression atmosphérique ?

La pression atmosphérique varie dans le temps. Si on examine ces variations en terme de fréquence, on trouve toutes les fréquences. En partant des hautes fréquences, on trouve d'abord les fréquences audibles qui n'ont en général qu'une amplitude très limitée. On a vu plus haut que des infrasons se produisaient suite aux séismes et au courant jets. L'amplitude correspondante peut être importante. L'arrivée d'une perturbation (grain, orage) se traduit par des chutes très importantes de la pression barométrique. Ensuite, on rencontre les variations journalières qui sont associées aux variations journalières de la température. Les grandes perturbations de l'atmosphère associées à l'avancée des fronts durent à peu près une semaine. Des variations encore plus lentes lors de l'établissement d'une zone de basse ou de haute pression peut aller jusqu'au mois. Enfin, on trouve les variations saisonnières et annuelles. Les variations séculaires ne peuvent conduire à aucun courant d'air.

Les variations de la pression atmosphérique ne pourront engendrer des courants d'air que si elles ne sont pas trop lentes. Cf. aussi la question A-17.

J-17- Quel est le temps de renouvellement de l'air d'une cavité ventilée ?

Pour une cavité ventilée en tube à vent, le temps de renouvellement de l'air a comme ordre de grandeur le volume total d'air de la cavité divisé par le débit d'air entrant.

Par exemple, la grotte de Gournier (Isère, France) avec son volume approximativement de 3 millions de m^3 et son courant d'air de l'ordre de 1 m^3/s voit renouveler son air en un temps de l'ordre de un mois.

J-18- Quel est le temps de renouvellement de l'air dans une cavité sans courant d'air ?

a) Rôle de l'eau d'infiltration. En l'absence de courant d'air, une grande cavité reliée à l'atmosphère par une entrée sera le siège de circulations d'air au moment des averses, car l'eau en descendant dans les fissures pousse l'air devant elle comme le ferait un piston, ce qui provoque un courant d'air soufflant (Mangin, Andrieux, 1988).

Par exemple, prenons le cas de la grotte de Gournier avec un débit sortant annuel de 3 millions de m^3 d'eau. Si on admet que l'eau en s'infiltrant pousse devant elle un débit volume d'air à peu près identique, alors le temps de renouvellement de l'air par l'infiltration de l'eau est de 1 an pour Gournier.

b) Pompage-respiration des cavernes. Dans le cas où ce mécanisme ne peut fonctionner (couverture étanche au-dessus par exemple) la cavité voit tout de même son air renouvelé par le phénomène de pompage-respiration de la cavité sous l'effet des fluctuations de la pression atmosphérique et du battement du niveau piézométrique (niveau de la surface de l'eau, si cette surface existe) à l'occasion des crues. Ce phénomène de respiration n'est pas à bilan nul car il se produit un mélange partiel à chaque arrivée du courant d'air dans un volume plus grand. Ce phénomène de mélange est irréversible. Il se traduit par une pseudo-diffusion.

On étudiera ce phénomène au tome 2, § 4.3.5.

Contentons-nous de donner un exemple comparable à la grotte de Gournier. Par exemple, prenons une cavité de longueur $L = 7000$ m , composée d'une succession de n salles avec $n = 40$, avec des fluctuations de pression jounalières de période $Pe = 86400$ s et une amplitude relative des fluctuations de la pression qui vaut $A = 5.\ 10^{-3}$.

Le temps typique de renouvellement complet de l'air de cette cavité vaut :

$$t = n\ Pe / 4A = 2000 \text{ jours soit 6 ans}$$

Ce temps est grand devant celui du renouvellement de l'air d'une cavité ventilée (un mois dans l'exemple de Gournier), mais il est tout de même petit par rapport aux temps géologiques.

Conclusion : lorsqu'il existe une jonction avec l'extérieur, une cavité voit son air renouvelé lentement par l'effet d'entraînement de l'eau d'infiltration. À ce mécanisme s'ajoute celui de pompage-respiration qui opère grâce aux fluctuations de la pression et du niveau piézométrique (la surface de l'eau). Ce dernier mécanisme est certes moins efficace qu'un courant d'air franc, mais il est bien supérieur à la simple diffusion moléculaire.

K- Effets acoustiques, instabilités et stratification

K-1- Qu'est-ce qu'un son ?

Le son est une perturbation périodique de la pression de l'air qui se propage à la vitesse dite vitesse du son. Si la fréquence de cette perturbation est comprise entre 15 et 20 000 Hz, le son est dans la gamme dite audible, c'est-à-dire perçue par l'oreille humaine. Si la fréquence est supérieure, on parle d'ultrason. Si la fréquence est inférieure à 15 hz, on parle d'infrason.

K-2- Quelle est la vitesse du son dans l'air (dans l'eau) ?

Dans l'air, la vitesse du son c_0 est donnée par la relation :

$$c_0 = \sqrt{\gamma \, r \left(273{,}15 + \theta\right)} \quad \text{avec} \quad \gamma = 1{,}405 \quad \text{et} \quad r = 287 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1} \quad \text{d'où} \quad c_0 = 20\sqrt{273{,}15 + \theta}$$

Dans cette relation c_0 est en m/s et θ est °C. Ainsi à 10°C la vitesse du son est de 338 m/s. Elle augmente légèrement quand la température augmente. Dans l'eau, le son se propage à une vitesse de l'ordre de 1500 m/s.

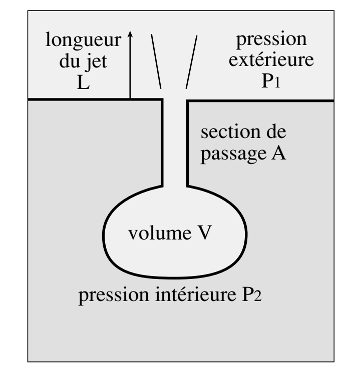
K-3- Existe-t-il des infrasons dans l'air, et d'où proviennent-ils ?

On trouve des infrasons d'amplitude importante. Plusieurs causes expliquent ces infrasons. Les séismes et les microséismes engendrent des infrasons de forte amplitude qui se propagent sur les distances énormes. On sait que les séismes s'accompagnent souvent de grondements sourds, ce qui montre qu'une partie des ondes est audible.

Le vent engendre aussi des infrasons. Par exemple, les fameux *courant jets* qu'on trouve à la limite entre des masses d'air polaire et des masses d'air tropical possèdent des vitesses élevées, jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres par heure. Ces vents engendrent des infrasons qui se traduisent par une forte respiration des cavernes (cf. Lewis, 1981).

K-4- Quel est le principe du résonateur de Helmholtz ?

Quand une cavité d'un volume assez important communique avec l'extérieur par une ouverture, cette cavité respire au gré des fluctuations de la pression atmosphérique. La cavité avec son couloir d'entrée est équivalente, *grosso modo*, à une masse accrochée à un ressort qu'on excite par une force sinusoïdale.



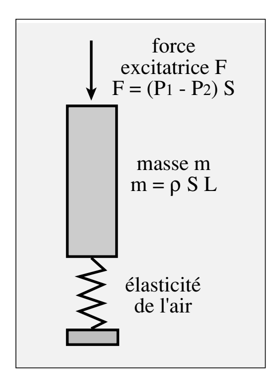


Fig. 2-51- Une cavité avec salle comme résonateur de Helmholtz

A cavity with a gallery and a chamber : a Helmholtz resonator

La pression extérieure est supposée varier comme :

$$P_1 = P_0 \left[1 + A \cos\left(2 \pi f t\right)\right]$$

On constate alors que la pression intérieure varie, elle, comme :

$$P_2 = P_0 \left[1 + B \cos\left(2 \pi f t + \varphi\right)\right]$$

La pression intérieure varie avec la même fréquence f que la pression extérieure excitatrice mais avec un déphasage φ. A et B sont les variations relatives de pression, t est le temps.

L'inertie mécanique du système est donnée par la masse du jet, le ressort est celui constitué par l'air dans la chambre et dont la pression peut varier (comme la tension d'un ressort) et qui exerce une force d'autant plus grande sur le jet d'air que la pression est plus grande.

La fréquence propre d'un tel système est donnée par (tome 2, § 2.5.6) :

$$f = \frac{a}{2 \pi} \sqrt{\frac{S}{V L}}$$

Fig. 2-52- Résonance dans l'excitation d'un résonateur de Helmholtz

Resonance frequency for the air-velocity in a Helmholtz resonator

Si la fréquence des infrasons atmosphériques est inférieure à la fréquence propre du système, la cavité V suit les variations de la pression extérieure avec un léger retard, mais l'amplitude des variations de pression est la même à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Si la fréquence des infrasons atmosphériques est voisine de la fréquence propre de la cavité, alors il y a amplification. L'amplitude des variations de pression dans la cavité peut être plus grande que l'amplitude des variations de la pression extérieure. Ce phénomène de résonance est caractéristique du résonateur de Helmholtz.

Enfin, si la fréquence des fluctuations de pression atmosphérique est nettement plus grande que la fréquence propre de la cavité, la cavité ne peut plus suivre. La pression dans la cavité varie beaucoup moins que la pression extérieure. Il y a amortissement des fluctuations extérieures.

Ainsi, on voit qu'une cavité naturelle est plus particulièrement sensible aux fréquences acoustiques voisines de sa fréquence propre. Les fluctuations plus ou moins aléatoires de la pression atmosphérique forment un ensemble de fréquences (décomposition en intégrale de Fourier) qui constituent une sorte de bruit. Dans cet ensemble, la cavité joue le rôle d'un amplificateur pour les fréquences voisines de sa fréquence propre et d'un amortisseur pour les fréquences nettement plus élevées.

Des mesures resteraient à faire pour prouver que certaines cavités à courants d'air oscillants fonctionnent en résonateur de Helmholtz, c'est-à-dire qu'elles amplifient les fluctuations de la pression extérieure.

Si la cavité est plus petite, la fréquence de résonance augmente et passe dans le domaine audio. Le résonateur de Helmholtz fonctionne alors comme absorbant acoustique, mais les courants d'air ne sont alors pas perceptibles. Les rugosités des parois jouent aussi le rôle d'absorbant mais par un autre processus : diffusion de l'onde progressive.

K-5- Quel est le temps typique pour atteindre la résonance ?

Vue la forte amplification qu'on peut obtenir, l'établissement d'un régime permanent nécessiterait un temps très long. On calcule un temps typique d'établissement de la résonance :

$$t_0 = 2 \pi \frac{V L^2}{a S^2} \quad \text{avec } a = 330 \text{ m/s la vitesse du son}$$

Ce temps est en général de l'ordre d'une heure pour les cavités avec des volumes appréciables.

K-6- Pourrait-on obtenir la résonance en régime permanent ?

Pour que la résonance puisse s'instaurer, il faudrait que l'onde excitatrice dure assez longtemps et qu'elle reste une onde cohérente pendant toute la durée d'excitation. Une onde cohérente est représentable par un train d'ondes qui ne subit pas de saut aléatoire de phase. Si on était capable de définir la durée de cohérence de l'onde excitatrice (à l'aide d'un microphone relié à un oscilloscope à trace très lente par exemple), c'est-à-dire le temps pendant lequel l'onde voit sa phase évoluer régulièrement sans saut, on pourrait alors calculer l'amplitude atteinte par les oscillations de pression.

On peut en conclure que le résonateur de Helmholtz formé par une cavité naturelle sous l'action d'infrasons naturels doit presque toujours se trouver en régime transitoire.

K-7- Quels courants d'air apparaissent dans un résonateur de Helmholtz ?

Les variations de pression d'un résonateur de Helmholtz excité, engendrent un courant d'air alternatif au col d'entrée du résonateur. Si la fréquence des excitations est nettement plus basse que la fréquence propre de la cavité, le phénomène est une simple respiration de la caverne. L'amplitude de la vitesse induite est alors donnée par la relation :

$$\Delta U = 2\,\pi\,\frac{f\,V}{\gamma\,S}\,\frac{\Delta p}{p}$$

Dans cette relation, f est la fréquence des excitations de pression, V le volume de la cavité, $\gamma = 1{,}4$, S est la section du couloir de liaison avec l'extérieur et $\Delta p/p$ est l'amplitude relative des fluctuations de la pression.

Si la fréquence d'excitation est proche de la fréquence propre de la cavité, des courants d'air plus importants peuvent alors apparaître. Enfin, si la fréquence est nettement plus grande que la fréquence propre, il n'y a pratiquement plus de courant d'air.

K-8- Peut-on réunir des conditions d'oscillations pour le courant d'air ?

Le résonateur de Helmholtz est un exemple parmi les plus simples des phénomènes acoustiques, dans la gamme des infrasons, qui peuvent arriver dans les cavités. Certains auteurs (cf. Choppy, 1986) signalent des oscillations dans le régime des courants d'air qui pourraient traduire le fonctionnement acoustique des galeries. En particulier des balancements de courant d'air entre deux galeries parallèles peuvent avoir une telle origine.

Pour étudier ces phénomènes, il faut introduire la notion d'impédance acoustique et considérer le système de conduits comme un circuit électrique. En réalité, les phénomènes ne sont pas linéaires comme en électricité et la modélisation par la méthode des impédances ne traduira pas totalement la complexité des phénomènes. Ce domaine de recherche reste largement à défricher (Badino, 1995).

Il resterait en particulier à étudier comment réagit une cavité à des fluctuations de pression à large spectre.

K-9- Quel est le mécanisme de formation des ondes acoustiques dans un instrument à vent ?

Les ondes acoustiques sont liées à un changement rapide dans la configuration d'un jet sur un biseau dont les fréquences propres d'oscillation en flexion interagissent avec celles du jet et sont sélectionnées par le volume d'air offert. Ces changements induisent des fluctuations de pression qui se propagent dans l'espace sous forme d'ondes acoustiques. Au niveau d'une cavité, on pourra retrouver des phénomènes analogues. Simplement, la cavité est un instrument de musique énorme et les sons qui seront émis se trouveront dans la gamme des infrasons.

K-10- Comment se propagent les ondes acoustiques audibles dans les galeries ?

La longueur d'onde des ondes acoustiques audibles est comprise entre 2 centimètres et 20 mètres. Lorsque la longueur d'onde est petite devant le diamètre équivalent de la galerie, le son se propage normalement par ondes sphériques qui se réfléchissent sur les parois de la galerie. Lorsque la longueur d'onde devient nettement plus grande que le diamètre de la galerie, cette dernière peut jouer le rôle de guide d'onde pour l'onde acoustique.

On voit que cette propriété apparaîtra pour les fréquences les plus basses, inférieures à 50 Hz. Tout le monde a remarqué que parmi les cris que peut émettre un spéléo, ce sont les sons graves qui se propagent le mieux dans les tubes. Ces derniers constituent de remarquables guides d'onde. Plus le conduit est grand, plus le son doit être grave.

K-11- Est-il facile de modifier le chemin d'un courant d'air ?

Oui pour certaines configurations de galeries. Par exemple un courant d'air qui sort d'un resserrement et aborde un divergent d'angle un peu supérieur à 8° présente une instabilité naturelle qui fait qu'il peut rester coller à un côté du divergent ou à un autre. Cette effet d'adhérence s'appelle l'effet Coanda (cf. bistable deux questions plus loin).

K-12- Comment une perturbation faible peut-elle entraîner des modifications importantes de sens ?

Cela ne peut arriver que lorsque l'état du système est naturellement instable.

K-13- Comment un courant d'air peut équivaloir à un bistable ?

Un bistable est un système qui peut occuper deux positions avec possibilité de passer assez facilement de l'une à l'autre.

Un écoulement a du mal à suivre un changement de direction. L'écoulement a tendance à se décoller de la paroi et à laisser apparaître un courant de recirculation. Cette instabilité ou ce décollement peut être induit par des causes de puissance très faible d'où l'effet amplificateur qu'on peut obtenir. L'écoulement de l'air sur l'anche d'un instrument à vent est un bon exemple de cette instabilité naturelle.

K-14- Qu'appelle-t-on stabilité pour une atmosphère donnée ?

Une masse d'air est dite stable si aucun mouvement ne l'anime. Elle est dite instable si elle est sujette à des mouvements d'ensemble. Comment peut-on prévoir qu'une atmosphère de profils donnés de température et de composition, est stable ou instable ? La méthode est simple. On déplace vers le haut ou vers le bas une petite masse d'air par la pensée et on examine les forces qui agissent sur elle. Si la résultante des forces a tendance à la ramener au point de départ, la masse d'air est dite stable. Si au contraire, elle a tendance à l'éloigner encore plus, la masse d'air est dite instable.

K-15- Est-ce qu'une atmosphère isotherme est stable ?

Le critère de stabilité n'est pas un critère de température mais de masse volumique. Si l'atmosphère est homogène en composition, c'est la température qui permet l'instabilité. Une atmosphère isotherme est une atmosphère stable.

K-16- Qu'est ce qu'une atmosphère adiabatique ?

Une atmosphère adiabatique est une atmosphère dont la température diminue avec l'altitude suivant une certaine loi. Une particule fluide montant rencontre des pressions plus basses, subit une détente adiabatique (sans échange de chaleur) et se refroidit. Si le profil de température de l'atmosphère est tel que la particule se trouve en permanence à la même température que les particules d'air qui l'environnent, on dit que l'atmosphère est adiabatique. La décroissance de la température dans ce cas est de 1 °C tous les 100 mètres.

K-17- Qu'est-ce que le gradient adiabatique sec ?

C'est la dérivée de la température par rapport à l'altitude (un gradient est un vecteur qui constitue la mesure de la variation). L'air en montant rencontre des pressions plus basses. Il se détend et s'il n'a pas le temps d'échanger de la chaleur, la détente est dite adiabatique, elle s'accompagne d'un refroidissement qu'on peut calculer. Il vaut -0,01 °C/m, soit encore un refroidissement de 1°C tous les cent mètres. Plus précisément, on démontre la relation (cf. tome 2 § 1.2.3) :

$$dT = -\frac{\gamma - 1}{\gamma}\, r\, g\, dz \quad \text{avec} \quad r = c_p - c_v = 287 \text{ J kg}^{-1}\text{ K}^{-1} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v} = 1{,}4$$

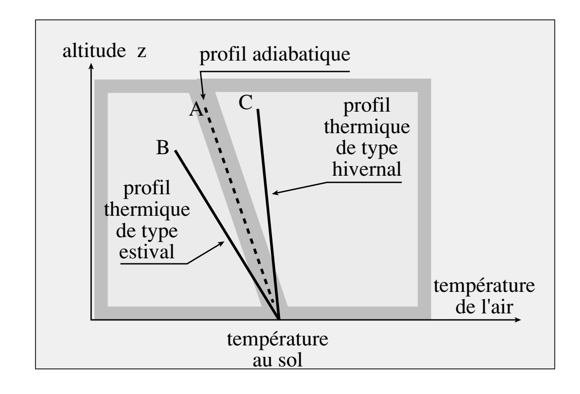


Fig. 2-53- Profils verticaux thermiques de l'atmosphère et instabilité

Atmospheric temperature versus altitude. Adiabatic profile A, unstable profile B, stable profile C

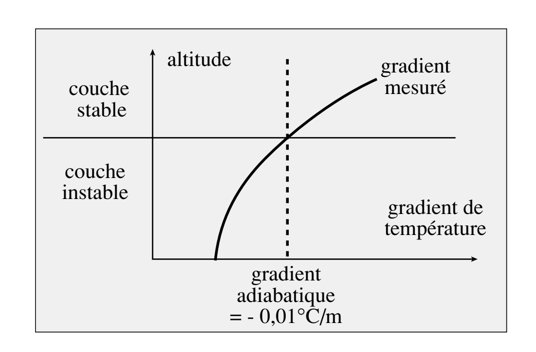


Fig. 2-54- Exemple d'atmosphère instable dans ses parties basses et stable au-dessus

Unstable atmosphere in the low part and stable in the upper part

K-18- Limite de stabilité d'une atmosphère ?

Une atmosphère non confinée a pour limite de stabilité l'atmosphère adiabatique.

Prenons par exemple une journée d'été avec le sol surchauffé par le soleil et qui réchauffe l'air sus-jacent. Le profil des températures de l'air est celui noté B. Ce profil est instable. Des cellules convectives apparaissent. Nuages dits cumulus de beau temps, qui pourront se transformer le soir en sombres cumulonimbus annonciateurs d'orages.

Prenons maintenant l'exemple d'une journée d'hiver avec inversion des températures. Il fait plus chaud en altitude qu'au fond de la vallée. Ce profil est parfaitement stable. L'air restera immobile. Les nuages dans le ciel seront du genre stratus.

Bien entendu, une atmosphère donnée peut être stable dans certaines de ses couches et instable dans d'autres. La figure au-dessus présente un exemple d'une telle atmosphère dont les cumulus viendront se former à la limite des deux couches.

Dans les grottes, la limite de stabilité, c'est-à-dire le démarrage de la convection, est souvent le profil adiabatique.

K-19- Instabilité des masses d'air avec une composition chimique variable de l'air ?

Examinons maintenant le cas d'un air de composition non homogène, présentant par exemple un gradient vertical en CO_2. Que devient notre critère de stabilité ? On déterminera le gradient limite au tome 2, § 1.2.8.

Si la concentration en dioxyde de carbone diminue vers le haut, on trouve que l'atmosphère est plus stable. En revanche pour une concentration de CO_2 croissante avec l'altitude, l'instabilité pourrait apparaître même pour des gradients thermiques positifs si le gradient de concentration en CO_2 est supérieur à 0,007 % par mètre.

On tient ici un puissant moyen de mélange. Dans une galerie de température uniforme, dont l'air serait donc parfaitement stable si la composition était homogène, le dioxyde de carbone libéré au plafond par les suintements dans le sol reste collé au plafond un certain temps car, sur de petites distances, la diffusion est plus efficace que la convection, puis le gradient de concentration de CO_2 augmentant, ce dioxyde de carbone rend l'atmosphère instable et brutalement il se produit un mouvement de convection de l'air, mouvement qui a pour résultat de rendre de nouveau l'air stable et homogène.

Ce mouvement de relaxation a une période liée au débit de CO_2 au plafond. C'est peut-être ce phénomène qui est à l'origine de mouvements observés dans la galerie Clastre à la grotte de Niaux en Ariège par Cl. Andrieux alors que la galerie était protégée par des siphons l'isolant de tout courant d'air. Cf. aussi tome 2, § 1.6.4.

K-20- Qu'est ce que l'effet Boycott ?

Il ne s'agit pas ici d'une réaction d'association de consommateurs mais d'un effet qui porte le nom d'un savant. Cet effet décrit l'instabilité due à une paroi oblique avec gradient de concentration ou de température.

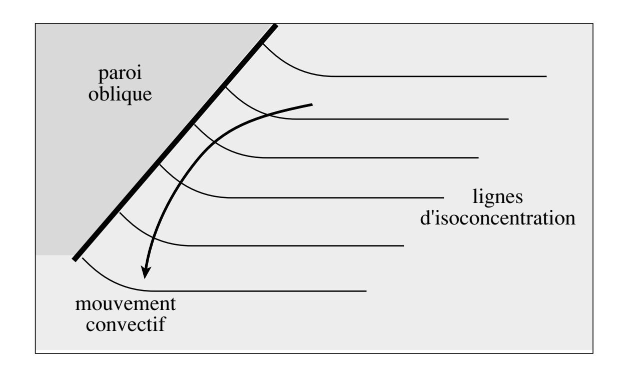


Fig. 2-55- L'effet Boycott

Boycott effect
with a vertical gradient of gas concentration

On pourrait imaginer qu'une répartition avec le gaz le plus dense en bas, est toujours stable. Il existe un mécanisme qui engendre un mouvement de convection. Il suffit d'une paroi oblique.

Le mécanisme est le suivant. En l'absence de paroi oblique, la diffusion conduit à un déplacement du fluide le plus dense vers le haut, compensé par un déplacement du fluide le moins dense vers le bas. La présence de la paroi empêche ce mouvement. Le flux à travers la paroi est nul, le vecteur flux est donc parallèle à la paroi et les isoconcentrations deviennent perpendiculaires à la paroi. Mais alors les isobares ne sont plus horizontales. L'excédent de gaz dense près de la paroi engendre une convection vers le bas du fluide. Cette convection tend à supprimer le déséquilibre de concentration. On en déduit que dans une salle avec une stratification en concentration même réputée stable, il peut apparaître un infime mouvement de convection. Il faudrait bien sûr analyser le rôle freinant ou retardateur de la viscosité.

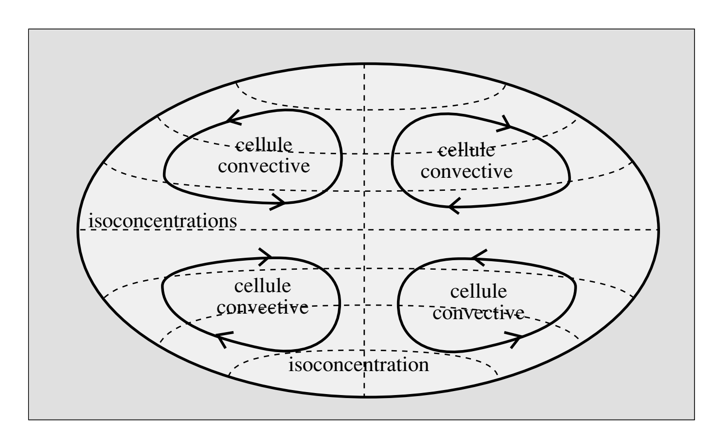


Fig. 2-56- L'effet Boycott dans une galerie ou une salle se traduit par des cellules convectives lentes

Boycott effect generate slow convection cells

Dans le cas d'une stratification thermique réputée stable, le mécanisme est similaire. La roche calcaire est bien plus conductrice que l'air. Les lignes de flux thermiques passent donc de préférence par la roche. Ces lignes de flux étant parallèles à la paroi, les isothermes sont perpendiculaires à la paroi et la convection qui prend naissance est du même type que celle décrite sur la figure.

Cet effet est analogue à l'effet Boycott bien connu en sédimentation.

K-21- Est-ce que l'instabilité de Marangoni joue un rôle ?

Cette instabilité est très différente des autres. Elle se produit à une interface eau-air. Il existe deux mécanismes. L'un a pour cause un échange de chaleur entre l'eau et l'air, l'autre un échange de gaz entre l'eau et l'air. C'est cette instabilité qui est à l'œuvre quand on chauffe une casserole d'eau par le bas. Elle repose sur la propriété que la tension superficielle dépend de la température et de la composition.

Nous nous contenterons de montrer le mécanisme physique de cette instabilité.

Les cellules créent une dissymétrie dans les échanges d'où une dissymétrie dans la température de surface. La tension superficielle dépend de la température. Les différences de tensions superficielles engendrent un mouvement en cellules plus ou moins hexagonales dans l'eau et dans l'air au voisinage de la surface libre. Le déséquilibre thermodynamique engendre un déséquilibre mécanique.

On définit un critère d'apparition de ces cellules convectives par un nombre de Marangoni critique qui vaut environ 80.

$$Ma = \frac{d\sigma}{dT}\frac{dT}{dz}\frac{h^2}{\mu\, a} \qquad Ma_c = 80$$

σ est la tension superficielle (70.10^{-3} N m^{-1} pour le couple eau-air et dσ/dT = -1,38.10^{-4} N m^{-1} K^{-1}), dT/dz est le gradient vertical de la température dans l'eau, h l'épaisseur de la cellule convective, μ la viscosité dynamique de l'eau (μ = 10^{-3} Pa.s) et a la diffusivité thermique de l'eau (a = 8.10^{-8} m^2 s^{-1}).

Ce mouvement dans l'eau engendrera un mouvement convectif dans l'air. Mais nous n'insisterons pas plus sur cette instabilité car nous n'avons pas connaissance d'observation de ce phénomène dans l'atmosphère des cavernes.

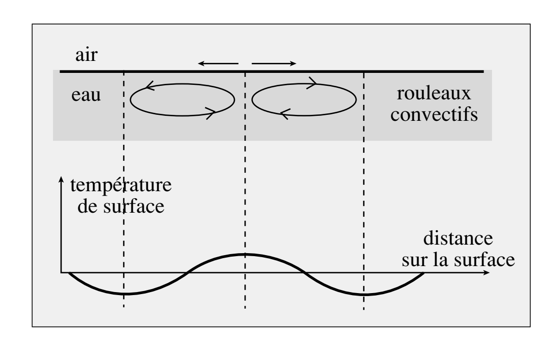


Fig. 2-57- L'effet Marangoni et mouvements convectifs

Marangoni effect associated with thermal sensibility of surface tension of water

K-22- Quelles sont les causes de stratification d'un courant d'air ?

La stratification de l'air apparaît quand des débits d'air de masses volumiques différentes se rencontrent sans se mélanger correctement. C'est la turbulence qui assure en général un bon mélange. Si les vitesses sont faibles, l'intensité turbulente est faible et le mélange des deux débits ne se réalise pas. Les deux fluides restent disposés l'un au-dessus de l'autre en fonction de leur densité.

K-23- Qu'est ce qu'on appelle nombre de Richardson d'un écoulement stratifié ?

On caractérise la stratification par le nombre de Richardson de gradient qui s'écrit (cf. aussi tome 2, § 1.3.9):

$$Ri \approx \frac{g\, e}{U^2}\frac{\Delta T}{T}$$

Dans cette relation g est l'accélération de la pesanteur, e l'épaisseur de la zone de mélange, ΔT l'écart de température et T est exprimé en Kelvin. On admet que lorsque le nombre de Richardson atteint 0,25 , il n'y a plus mélange entre les deux couches superposées. La zone de mélange cesse d'évoluer, la stratification reste stable.

Ainsi, un écoulement chaud qui reste stratifié avec une vitesse seulement en haut de la galerie conduit à une zone de transition d'épaisseur e qui pour un nombre de Richardson de 0,25 a pour valeur :

$$e = 7\,\frac{U^2}{(T_1 - T_2)} \qquad \text{U en m/s et e en m}$$

Par exemple pour un écart de température de 4°C et une vitesse de 0,5 m/s, on en déduit l'épaisseur de la couche de mélange e = 0,4 m. La stratification sera possible dans une galerie si l'épaisseur de la zone de mélange est inférieure à la hauteur de la galerie.

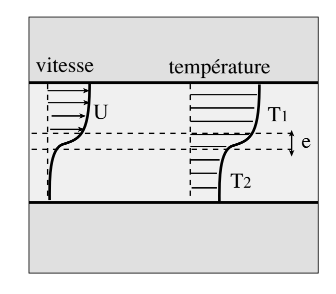


Fig. 2-58- Stratification d'un courant d'air

Stratified air flow

Appliquons ces principes à l'observation à la grotte de la Cullalvera (§ 1.5.5) :
ΔT = 12°C, U = 0,5 m/s d'où e = 0,14 m ce qui correspond à la zone de trouble au-dessus de la nappe de courant d'air froid.

K-24- Comment se fait le mélange entre deux flux d'air qui se rencontrent ?

Deux flux d'air qui se rencontrent à l'occasion d'un carrefour se mélangent brutalement grâce à la turbulence. Le cas le plus progressif est celui d'un air chaud qui arrive au-dessus d'un air froid. Ce cas correspond à la vitesse de mélange la plus faible. À partir de la zone de contact, se développe une couche de mélange dont l'épaisseur croît vers l'aval. Ce développement se fait par appariement des gros tourbillons.

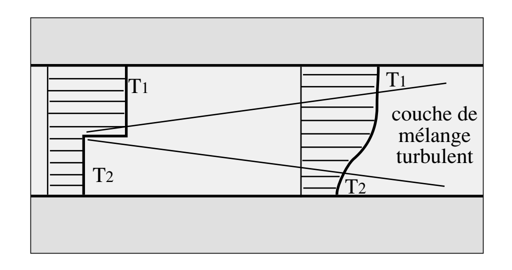


Fig. 2-59- Mélange de deux courants d'air qui se rencontrent

Mixing of two different temperatures air flows

Ces appariements permettraient une croissance à peu près linéaire de la couche de mélange sauf, justement, dans le cas d'une stratification thermique stable, pour laquelle la couche de mélange cesse de croître quand le nombre de Richardson atteint 0,25.

K-25- Comment la stratification atténue-t-elle le mélange turbulent entre deux fluides ?

Dans un mélange turbulent, la zone de mélange augmente linéairement en taille avec la distance au point de mélange. L'angle du dièdre qui contient cette zone de mélange est de l'ordre de 15°. On constate qu'en présence d'une stratification, la taille de la zone de mélange augmente jusqu'à ce que le nombre de Richardson de gradient atteigne une valeur de 0,25 et qu'ensuite la zone de mélange garde une dimension constante (Viollet 1997).

Ce phénomène existe aussi dans l'inhibition du mélange dans un coin eau salée - eau douce et permet de comprendre la superposition d'une eau douce en haut sur un coin d'eau salée en bas dans le cas de la résurgence de Port Miou par exemple. On constate expérimentalement que les transferts de masse sont plus inhibés que les transferts de quantité de mouvement. La raison en est que des ondulations à l'interface (instabilités de Kelvin-Helmholtz) créent une certaine «rugosité» qui facilite l'échange de quantité de mouvement.

On montre que la stratification inhibe le développement des grands tourbillons de la turbulence. Les seuls tourbillons qui subsistent sont ceux dont la taille est comprise entre l'échelle d'Ozmidov et l'échelle de dissipation visqueuse de Kolmogorov, c'est-à-dire les petites échelles. C'est ce mécanisme d'inhibitions des grosses structures qui explique la persistance de couches stratifiées relativement stables, alors qu'on s'attendrait à ce que le mélange turbulent sépare les deux composantes de masses volumiques différentes.

C'est ce mécanisme qui explique pourquoi le mélange de couches à fortes concentration de CO_2 ne se mélangent pas facilement avec des couches d'air ordinaires, même en présence de courant d'air. Ce mécanisme est appelé décantation par Choppy.

K-26- Avec quelle vitesse une avalanche d'air plus lourd s'étale-t-elle dans une galerie horizontale ?

Benjamin a proposé en 1968 une théorie très simple qui donne un bon ordre de grandeur de la vitesse d'avancement d'un front de courant de gravité (Viollet, 1997 p. 168, et tome 2, § 1.3.9).

$$U \approx \left(1 - \frac{H}{d}\right)\sqrt{2\,g\,H\,\frac{\Delta T}{T}}$$

Dans ce modèle le fluide avance à gauche à vitesse constante et le front est immobile. Les forces de frottement sur les parois sont négligées. Dans cette configuration de front immobile, l'épaisseur du courant de densité augmente si la vitesse diminue. Si la vitesse augmente, l'épaisseur du courant diminue.

Dans la configuration où l'air de la galerie est à vitesse nulle, le courant de densité a une vitesse égale à -U. Cette vitesse est d'autant plus grande que la différence de masse volumique (ou de température) est plus grande.

On en déduit l'évolution de la vitesse pour un gaz lourd libéré à un instant donné dans toute la section d'une galerie. Au début, le courant occupe toute la galerie, puis le nuage démarre et s'étend sur la moitié de la hauteur environ.

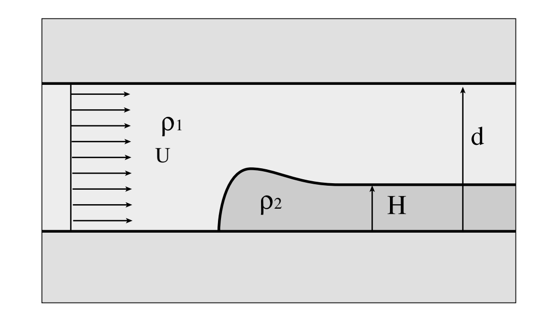


Fig. 2-60- Courant de densité
(le repère est celui du front du courant)

Density current of cold air

Au fur et à mesure que la hauteur diminue (conservation du volume de l'air engendrant l'avalanche), la vitesse diminue pour s'annuler quand l'avalanche est étalée.

K-27- Peut-on proposer un modèle simple des courants de densité ?

Oui, c'est le modèle de Benjamin dont le résultat est indiqué à la question précédente.

L- Air humide, évaporation et chimie

L-1- Qu'est-ce qu'un diagramme psychrométrique ?

Contrairement aux apparences, ce terme n'a rien à voir avec la psychologie.

C'est le diagramme (dit aussi de l'air humide) qui indique pour chaque température et une pression donnée, la quantité de vapeur (en kg par kg d'air sec) que peut contenir l'air à saturation et pour différents degrés d'humidité de l'air. On étudiera ce diagramme au tome 2, § 1.1.4.

L-2- Qu'est ce qu'un air sursaturé ?

C'est un air qui contient plus de vapeur que la courbe de saturation le laisserait penser. Pour obtenir cet état métastable, il ne faut pas qu'il existe de germes de condensation dans l'air, c'est-à-dire des poussières et des ions qui pourraient servir de départ à la condensation. On dit qu'un état est métastable si une perturbation très petite suffit à le basculer dans un autre état (ici un brouillard).

L-3- Comment cesse la sursaturation ?

Au-delà d'une certaine quantité de vapeur, la sursaturation cesse alors brutalement et un brouillard envahit la masse d'air.

L-4- Comment l'eau se condense-t-elle sur une paroi ?

Si la paroi est plus froide que la température de rosée de l'air; les particules d'air qui lèchent la paroi se refroidissent à son contact, l'air devient sursaturé et se condense sur les gouttelettes accrochées aux aspérités de la paroi.

L-5- Qu'est-ce que le gradient adiabatique humide ?

Si l'air est à saturation, une petite montée en altitude le refroidit encore et des gouttelettes se condensent, formant un brouillard. La chaleur latente de changement d'état ralentit le refroidissement. Le gradient adiabatique humide ne vaut environ que -0,5 °C/100m (calcul dans le tome 2 § 1.2.3.b). Le gradient d'une grandeur est la mesure de sa variation.

L-6- Quels sont les processus d'évaporation de l'eau ?

L'eau s'évapore à partir d'une paroi ou d'un volume d'eau. Un écoulement d'air non saturé vient former une couche limite de concentration au voisinage de la surface libre de l'eau. L'air au voisinage immédiat de l'eau est toujours saturé. L'air au loin ne l'est pas comme on l'a supposé. Il s'installe donc un gradient de concentration en vapeur d'eau qui se traduit par un flux de vapeur, ce qu'on appelle évaporation.

L-7- L'évaporation de l'eau peut-elle former de la glace dans les glacières naturelles en été ?

On lit parfois que la glace qu'on trouve dans les glacières naturelles se forme en été par évaporation de l'eau qui suinte sur la paroi. Le gel étant provoqué par le refroidissement dû à l'évaporation.

Pour les glacières naturelles, la glace ne peut pas se produire par évaporation due à un courant d'air car l'été, il n'y a pas de circulation d'air dans une glacière qui fonctionne comme un piège à air froid. La seule façon de produire de la glace en été dans une glacière naturelle est l'écoulement de l'eau sur une roche de température négative (à cause des circulations d'air en hiver).

L-8- Dans quelle condition, l'évaporation de l'eau peut-elle former de la glace ?

L'eau peut-elle geler suite à l'évaporation dans un courant d'air ? La réponse est oui. La température atteinte au bout d'un certain temps par l'eau au contact d'un courant d'air donné est la température dite humide de cet air. Sur un diagramme psychrométrique, il est facile de voir que la température humide sera inférieure à 0°C si par exemple l'air est à 0% d'humidité et à une température inférieure à 9°C, ou bien encore, si l'air est à 50% d'humidité et à une température inférieure à 3,5°C. Ce phénomène peut donc s'observer à l'entrée d'un trou aspirant un air extérieur bien sec (cf. le diagramme au tome 2, § 1.1.4).

L-9- Qu'est-ce que le Föhn ?

C'est un vent chaud et sec qui souffle de l'est dans les vallées alpines de Savoie. L'air provient de la plaine du Pô. Le franchissement de la chaîne alpine s'accompagne d'une montée de l'air, ce qui entraîne un refroidissement et une condensation de la vapeur d'eau. Mais la chaleur latente libérée par cette condensation atténue beaucoup le refroidissement (gradient adiabatique humide). Il pleut donc sur le versant italien. L'air desséché redescend ensuite sur le versant français. Le réchauffement s'opère (gradient adiabatique sec) et la température obtenue, à altitude égale, est supérieure de quelques degrés de celle côté italien.

L-10- Peut-on observer sous terre des phénomènes équivalents du Föhn ?

Cet effet se rencontrera dans une cavité chaque fois qu'un air saturé en humidité montera de quelques centaines de mètres et redescendra un peu plus loin. Dans la montée, l'air sera très humide (avec brouillard éventuel) et condensera sur les parois. Dans la descente au contraire, l'air sera sec et les parois aussi.

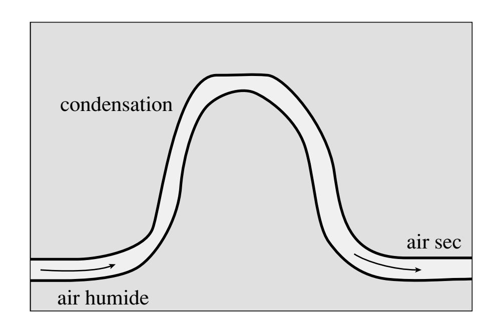


Fig. 2-61- Le phénomène du Föhn sous terre
Föhn phenomena in a cave : drying and warming of air flow

L-11- Comment se fait l'échappement du dioxyde de carbone de l'eau des concrétions ?

Il se fait par dégazage à la surface de l'eau. La pression partielle de dioxyde de carbone est plus faible dans l'air que dans l'eau (cause de la formation de la concrétion) il y a donc migration (diffusion) du gaz vers la surface de l'eau et dégazage progressif (loi de Henry).

L-12- Comment la tension superficielle eau-air commande le diamètre d'une fistulaire ?

L'eau qui sourd du tube de la concrétion est retenue à elle tant que les forces de tension superficielle sont assez grandes pour vaincre le poids. Au moment du décrochage, le poids de la goutte est juste égal aux forces de tension superficielle d'où la relation (loi de Tate) :

$$\frac{\pi d^3}{6} \rho g = \pi d \sigma \Rightarrow d = \sqrt{6 \frac{\sigma}{\rho g}} = \sqrt{6 \frac{0,07}{1000.\ 9,8}} = 6,6.10^{-3} \text{ m} = 6,6 \text{ mm}$$

d est le diamètre de la goutte, σ est la tension superficielle. Comme la tension superficielle varie en fonction des impuretés de l'eau, le diamètre calculé pourra lui aussi varier dans une petite plage.

L-13- Le courant d'air contient-il des traceurs naturels susceptibles de s'imprimer dans la roche ? O_{18}

Les gaz qui composent l'air des cavernes possèdent une composition isotopique variable. Prenons l'exemple de l'oxygène. Les isotopes principaux sont l'oxygène 16 et l'oxygène 18. L'eau de mer contient, lié à l'hydrogène, de l'oxygène dont le rapport isotopique est à peu près uniforme partout (500 fois plus de O_{16} que de O_{18}).

Mais le processus d'évaporation favorise les molécules d'eau les plus légères, ce qui fait que la vapeur d'eau se retrouve avec un taux d'O_{18} plus bas que celui de l'eau de mer.

Effets des glaciations anciennes. Lorsque la température moyenne de la terre est basse (glaciation), l'eau se dépose sur les continents sous forme de neige qui se transforme en glace. Cette glace a une teneur moins grande que l'océan en O_{18}. Et réciproquement l'océan a une teneur en O_{18} augmentée. Les fossiles du fond de la mer gardent le témoignage de ces variations.

Effet de l'évaporation et de la condensation. Pour les périodes actuelles, l'eau qui s'évapore de la mer a un taux de O_{18} plus faible, ce qui entraînera un taux plus faible pour l'eau de condensation. Comme cet effet dépend de la température, on peut en déduire les conditions de température qui ont présidé à l'évaporation de l'eau de mer. Ainsi les pluies d'été contiennent plus de O_{18} que les pluies d'hiver.

Effets de cristallisation. Lorsque un dépôt de calcite se fait à partir d'une eau donnée, le phénomène de cristallisation favorise l'isotope lourd de l'oxygène. Ainsi, la calcite aura une teneur en O_{18} un peu plus grande que l'eau de formation. Cet effet dépend aussi de la température.

Si on arrive à déterminer la teneur en O_{18} de l'eau de mer à une époque donnée, on peut alors en analysant la teneur en O_{18} de la calcite et en tenant compte des différents effets, déterminer la température de l'atmosphère de l'époque. L'étude des paléoclimats étant tout à fait à l'ordre du jour, il est facile de deviner que ces études sur les différentes concentrations d'isotopes pullulent. On lira avec profit le chapitre *Cave deposits and past climates* du livre *Caves, processes, developpment, management* de David Gillieson (1996), chez Blackwell publishers (USA).

L-14- L'air des grottes contient-il des ions ?

Curieusement, on ne trouve guère d'allusion à cette question dans les ouvrages scientifiques récents, mais F. Trombe en parle (Trombe, 1952 p. 260-265). Les études sont anciennes et montrent (Elster et Geitel 1901) que la conductivité de l'air des grottes est plus grande que celle de l'air extérieur. On sait que la conduction électrique dans l'air est due à la présence d'ions (particules chargées). Si les ions sont de petite masse moléculaire, la conductivité en est élevée (car c'est la mobilité des ions multipliée par leur charge qui compte). S'ils sont de grandes masses moléculaires, la conductivité est faible. Un brouillard fixe naturellement les ions légers et en diminue la conductivité. Les études de Trombe montrent que la conductivité de l'air des grottes est presque toujours plus grande quand le courant d'air est soufflant et que cet air vient de zones profondes. On explique cela par l'existence de matières radioactives dans les argiles de décalcification (le radon est un gaz radioactif qu'on trouve dans l'air des cavernes). Ces particules produisent au cours de leur désintégration, des ions aussi bien positifs que négatifs. La vitesse limitée de ces ions (10 µm/s pour un champ de 100 V/m par exemple) fait que l'air reste conducteur un certain temps avant que les ions disparaissent. C'est la production continue d'ions qui permet à l'air de rester conducteur.

On sait par ailleurs que les ions peuvent servir de noyau de condensation pour la vapeur d'eau. Ce fait explique la rareté des phénomènes de sursaturation de l'air des grottes.

L-15- L'air des grottes est-il bénéfique aux asthmatiques et pourquoi ?

Les spéléos qui souffrent de l'asthme trouvent en général que l'air des cavernes est bon et ils n'éprouvent que rarement des crises dans les gouffres (Féniès, 1965). En Allemagne et dans les pays d'Europe centrale, il était courant de traiter certaines affections respiratoires par des cures dans les grottes. En Allemagne on parle de *Speläotherapie*. La célèbre mine de sel de Wieliczka en Pologne a connu aussi sa vogue de cure. Féniès, dans sa thèse de médecine signale une station thermale souterraine en Autriche près de Badgastein associée à une source thermale (40°C). En Hongrie, dans le réseau souterrain de Braradla près d'Aggtelek, la cure se passait à une température plus spartiate de 10°C. La raison de l'amélioration de l'état des asthmatiques réside peut-être dans l'humidité de l'air des grottes associée à la faible teneur en poussières ou en particules allergènes. Le développement de médicaments plus efficaces semble avoir marqué la fin de ces sanatoriums.

L'air des grottes, loin des entrées, n'est pas propice à une vie permanente (trop humide) mais les habitations troglodytes près de la surface, offrent des caractéristiques climatiques très intéressantes (Loubes, 1984).

M- Phénomènes de transports et systémique

M-1- Qu'appelle-t-on phénomènes de transport ?

Les phénomènes de transport représentent la classe des phénomènes qui associent des échanges de masse, quantité de mouvement et énergie à un écoulement de fluide.

M-2- Qu'est-ce qu'un régime permanent, transitoire ?

Un écoulement est dit en régime permanent si la vitesse en un point reste constante (dans le temps). On a vu que les écoulements souterrains sont turbulents. Un courant d'air sensible ne peut donc pas être permanent. Pour un écoulement turbulent, permanent en moyenne, on dira que le régime est stationnaire. Si l'écoulement moyen se modifie dans le temps, on parle d'écoulement transitoire.

M-3- Un réseau souterrain est-il un système fermé ou ouvert (au sens de la thermodynamique)?

Un système est dit fermé, s'il n'y a pas d'entrée-sortie de matière aux frontières. Le karst est un système ouvert puisque des débits d'eau et d'air y transitent.

M-4- Qu'est-ce que l'énergie interne, l'enthalpie d'un fluide ?

Le courant d'air transporte avec lui (on dit advecte) de la masse (débit-masse), de la quantité de mouvement (débit de quantité de mouvement) et de l'énergie (débit d'énergie ou puissance). On a vu que le fluide se maintenait en mouvement grâce à un gradient de pression. Si on fait le bilan énergétique d'un volume donné de fluide, l'incorporation du travail des forces de pression à l'énergie interne fait apparaître une nouvelle fonction d'état appelée enthalpie. L'enthalpie joue pour un système ouvert le même rôle que l'énergie interne pour un système fermé.

M-5- Dans quelle condition une transformation de l'air humide est isotherme, isenthalpe, adiabatique ?

Une transformation isotherme est une transformation à température constante, une transformation isenthalpe est une transformation à enthalpie constante qui peut faire apparaître de la condensation de l'évaporation. Une transformation adiabatique se fait, quant-à-elle, sans apport ni perte extérieure de chaleur.

M-6- Pourquoi peut-on dire qu'un réseau parcouru par de l'air est un moteur thermique ?

Un moteur thermique utilise deux sources à températures différentes pour produire un certain travail mécanique. Le courant d'air des tubes à vent se traduit aussi par de l'énergie mécanique (dissipée *in fine* en chaleur) dont l'origine est souvent une différence de température. C'est donc bien un moteur thermique.

On a vu qu'un courant d'air transporte avec lui de la matière, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Le karst se comporte grâce à lui comme une machine thermique. Elle est connectée à une plus grosse machine qui est la terre elle même. Si on isole le karst par la pensée, l'environnement terrestre constitue une source de chaleur à température variable, et peut fournir au karst de la chaleur. Le karst emmagasine cette chaleur, et ce stockage constitue une mise en mémoire de la température antérieure de l'atmosphère. Un moteur thermique se crée puisqu'il y a deux sources à des températures différentes. Une, représentée par la température actuelle de l'atmosphère, l'autre représentée par la température actuelle du calcaire, c'est-à-dire la température ancienne de l'atmosphère mise en mémoire par le calcaire. Le courant d'air représente de l'énergie mécanique résultant du pompage d'entropie de la source chaude vers la source froide. Le moteur est du genre des échangeurs de chaleur à régénération. Il n'existe pas de moteurs artificiels de ce type-là.

Si on se place à l'échelle de la terre toute entière, le processus est le même. Le vent est créé par la machine thermique dont la source principale est le soleil et la source froide l'espace extérieur à la terre. Finalement, c'est parce que le soleil est une source d'énergie à basse entropie qu'il y a des vents et une circulation atmosphérique. De même, les courants d'air souterrains résultent de cette source de chaleur à basse entropie. Si on suit les raisonnements de Prigogine et d'autres, la basse entropie du soleil résulte de l'expansion de l'univers et, si l'on veut, du Big Bang qui est une "explosion d'entropie" (l'énergie de l'univers est constante et même nulle, c'est l'entropie seule qui croît !).

M-7- Quel est le rendement de ce moteur ?

Le rendement maximum d'un moteur est celui défini par Carnot $\eta = 1 - T_2/T_1$. Dans cette relation les températures, exprimées en K, sont les températures extérieure et intérieure. Dans le cas de sources de températures voisines (dont l'écart est de l'ordre de 20°C au maximum), ce rendement maximum est très petit (6 %). Le rendement réel du moteur thermique associé au courant d'air est encore bien plus petit. Ce moteur est très peu performant. On n'a jamais vu quelqu'un installer une turbine sur une cheminée !

M-8- Pourrait-on récupérer l'énergie liée au courant d'air ?

Dans le principe oui, mais il vaudrait mieux penser d'abord à récupérer l'énergie de l'eau (turbine dans les puits et les cascades) plutôt que celle beaucoup plus faible de l'air. On a vu cela à la question H-3.

M-9- Quel est le volume d'une cavité ?

Une cavité est un être géométrique complexe, une sorte de surface enserrant des fluides, eau ou air. Le volume de cette cavité dépend de la longueur minimale choisie pour sa description. Cette longueur est une longueur étalon, ou minimale. Elle peut être considérée comme la maille d'une sorte de filet permettant la description de la cavité. Si cette longueur est de l'ordre de 20 à 30 cm, la cavité est la cavité des spéléos. Si la longueur choisie est 1 mm, le volume est plus grand, c'est la cavité pour les échanges gazeux. Si la longueur est 1 µm, le volume augmente encore, c'est la cavité des micro-organismes. Si on descend à l'échelle du nanomètre, on n'a aucune idée de ce à quoi ressemble la cavité. La cavité doit sans doute recouvrir tout le massif. On reprendra cette question au tome 2, § 4.1.2.

Les idées de Mandelbrot (1984) qui ont prolongé celles de Richardson (longueur des côtes de Bretagne) nous ont habitué à cette idée de multiplicité de représentation. On généralise ainsi la controverse ancienne sur le réseau des spéléos opposé au réseau des fentes !

La cavité des spéléos explorateurs n'est pas tout à fait une surface enserrant un fluide (eau ou air). C'est plutôt un volume qui apparaît quand il a enlevé par la pensée tous les matériaux meubles (galets, sable, argile) ou rapportés (calcite). Le volume de cette cavité-là est plus grand que le volume réel. C'est d'ailleurs cette vision de la grotte qui lui permet de trouver les suites en déblayant certaines galeries.

M-10- Qu'est-ce qu'on appelle système en physique ?

Le système en physique est l'ensemble matériel ou géométrique sur lequel on applique les lois de la physique. Par exemple, la loi de Newton (mécanique) indique que la dérivée temporelle de la quantité de mouvement d'un système matériel est égale à la somme des forces extérieures. La notion de forces extérieures n'a de sens que si on a défini un système, c'est-à-dire un ensemble matériel ici. Les forces entre des parties du système seront dites intérieures alors que les forces s'exerçant entre une partie extérieure et une partie intérieure au système seront dites extérieures. La définition d'un système physique passe par la définition précise de la surface qui le limite. Les systèmes des mécaniciens sont en général des systèmes matériels (constitués de particules de matière) alors que les systèmes des physiciens sont plutôt des systèmes géométriques contenant de la matière.

M-11- Qu'appelle-t-on système en analyse systémique [Delannoy, 1997] ?

Un système est un être qu'on peut individualiser, c'est-à-dire qui possède des limites, et constitue une unité. Un système présente une structure et il est fonctionnel. Il est en interaction avec son voisinage. Ces interactions provoquent une évolution temporelle du système et éventuellement de son environnement.

On voit que la définition rejoint celle des physiciens pour tout ce qui concerne les propriétés physiques. En revanche, les systèmes du genre de ceux mis en œuvre en sciences sociales représentent une extension des sytèmes des physiciens.

Le système karstique s'intègre tout naturellement dans ces définitions (cf. tome 2, partie 4). Il est vrai que certains hydrogéologues réservent l'appellation de système karstique à la seule unité de drainage. Mais le concept de système est vaste et peut supporter des acceptions voisines et plurielles.

Conclusions de la deuxième partie

Ce kaléïdoscope de questions nous a fait entrevoir la complexité des questions qui se posent en climatologie souterraine. Les réponses ne sont qu'effleurées. Dans le tome 2, nous reviendrons sur certaines questions pour en développer des modèles quantitatifs. Mais la lecture en sera plus difficile.

Le gros intérêt de ce kaléïdoscope est d'avoir pu aborder des questions très variées. La brièveté de la réponse est dans certains cas, une frustration, mais aussi le gage de ne pas s'ennuyer à des explications trop fournies. Les questions qui concernent les courants d'air et les explorations, pourront rendre service en obligeant le spéléo à clarifier ses idées, en supprimant certaines fausses notions, voire quelques théories fumeuses. Et éventuellement, le spéléo de retour d'expédition, et se posant des questions sur une observation bizarre qu'il n'aura pas comprise sur le moment, pourra peut-être trouver matière à réfléchir. De même, la partie sur le dynamitage et la toxicité des composants de l'air a été écrite dans un but utilitaire. Plus avant dans cette deuxième partie, les questions sont devenues plus ardues, voire même un peu incompréhensibles à certains. Mais ce livre n'a pas vocation à être lu d'une traite comme un roman, mais plutôt à être arpenté au gré des questionnements ou des inspirations.



Fig. 2-62- Le dessinateur Du Bouillon a bien saisi le mythe du courant d'air
chez les spéléos

Troisième partie

Recherches expérimentales dans les grottes ou les gouffres

Le monde souterrain se prête déjà difficilement à l'exploration, la topographie consomme une énergie folle en temps et en séances frigorifiantes, alors faire en plus des mesures ! Cela semble une gageure pour des amateurs.

Pourtant certaines mesures sont à la portée de l'amateur. Le matériel s'allège, les appareils deviennent transportables, alimentés le plus souvent en piles électriques. Les mémoires vives (mémoires flash) voient leur prix baisser à toute allure. Bientôt le spéléo pourra laisser une petite centrale d'acquisition dans une cavité et revenir un an plus tard pour en vider les mesures dans un ordinateur.

Mais attention ! la facilité croissante des mesures aura pour conséquence qu'un fatras de données numériques sera à la disposition du spéléo. Cette mine n'a aucun intérêt en soi. Il ne sert à rien d'accumuler les données si l'on n'a pas un projet associé, si ces données n'ont pas été collectées dans un but précis. Les mesures doivent toujours suivre un programme d'étude ou une interrogation sur le réseau. On ne doit pas faire des mesures en se disant : «cela servira toujours à quelqu'un». Car alors on constaterait plus tard, avec amertume, qu'on aurait oublié de mesurer un certain paramètre physique très important pour la compréhension du phénomène. Et tout ce travail serait perdu.

Bien que le texte et les méthodes de mesures ne soient pas destinés aux chercheurs professionnels, ces derniers pourront néanmoins tirer quelque profit de certaines méthodes adaptées aux spéléos.

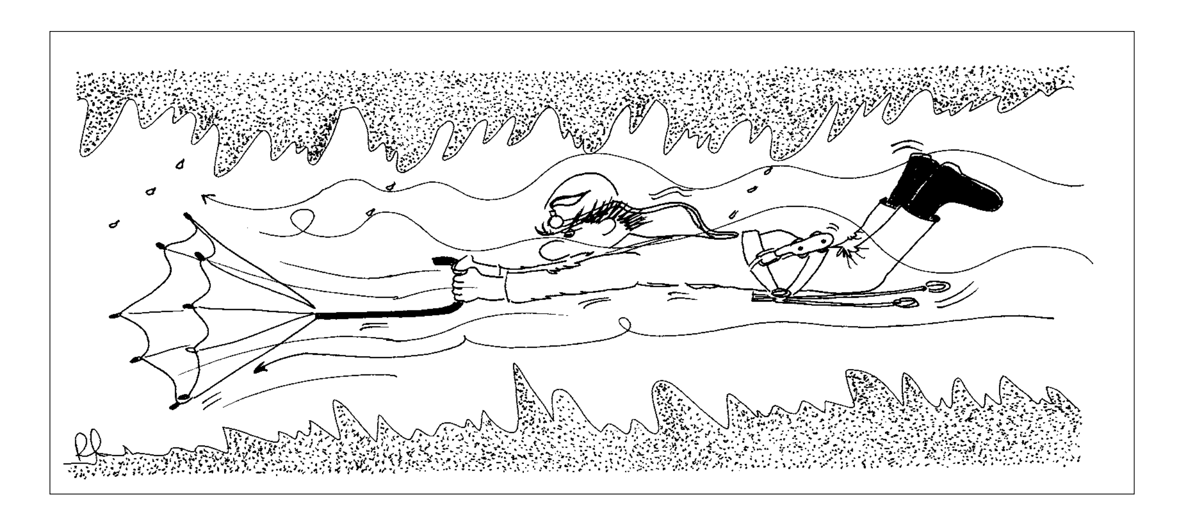


Fig. 2-63- La folie du spéléo va l'entraîner encore plus loin dans l'étude des cavernes !

(dessin de Régine Landry)

Caver's fever takes people on to further cave studies

Introduction

Nous ne saurions trop conseiller à ceux qui veulent faire de bonnes mesures de se procurer le rapport *The Mœstroff cave, a study of the geology and climate of Luxembourg's largest maze cave* de Francis Massen (1997) qui est une merveille sur le sujet. Les articles et la thèse de Claude Andrieux (1970, 1971, 1974) restent irremplaçables aussi.

Les instruments cités dans ce chapitre sont choisis en fonction de leur bas prix et de leur transportabilité (cf. l'article de C. de Douhat, 1980). Ils n'épuisent absolument pas les possibilités de choix. Ils ont été choisis non pour des critères de recherches scientifiques mais en fonction de leur accessibilité à un club ou à un CDS. L'instrumentation voit en ce moment une évolution considérable vers l'abaissement des poids et des coûts. Tout catalogue proposé serait obsolète en quelques années. Pourtant, nous citons dans le texte plusieurs fois le catalogue Fisher Bioblock Scientific (www.ebio-block.com) car son opulence (2004 pages) offre un magnifique terrain de rêve, un peu comme le catalogue de Manufrance pouvait faire rêver le gamin que j'étais il y a 50 ans ! La firme allemande Testo (www.testo.be) offre aussi une belle panoplie d'appareils portables, pour la température, la vitesse ou la composition de l'air.

De toute façon, en expérimentation, la précision et la finesse des mesures doivent être adaptées à la finesse de l'interprétation. Ce n'est pas que des mesures très précises n'aient pas d'intérêt, c'est que l'effort considérable fourni pour les obtenir serait mieux utilisé à interpréter plus finement les mesures. Pour en savoir plus sur le fonctionnement des capteurs, nous renvoyons le lecteur à des ouvrages spécialisés (par exemple Asch, 1991).

3.1. Paramètres locaux

3.1.1. Caractéristiques d'un capteur

Rappelons tout d'abord quelques propriétés générales des capteurs.

Précision. La précision indique l'erreur maximale faite sur la mesure. Par exemple, un thermomètre précis au 1/10°C qui affiche 5,2°C nous indique que la température du capteur est comprise entre 5,1 et 5,3 °C. Mais cette température n'est pas forcément la température de l'air dans lequel il se trouve. Il faut éliminer les causes d'erreur comme la présence trop rapprochée d'un spéléo, par exemple.

Finesse d'affichage. C'est la plus petite valeur qui apparaît sur l'écran des appareils électroniques. Par exemple, un thermomètre est gradué au degré ou au 1/10 de degré. Un anémomètre qui indique les vitesses en m/s avec un chiffre après la virgule affichera les vitesses à 10 cm/s près.

Sensibilité. La sensibilité est la plus faible variation de la grandeur pour laquelle le capteur réagit. Par exemple, un altimètre qui affiche le mètre aura une sensibilité de 1 m s'il réagit quand on le baisse ou on le monte de 1 m. Le plus souvent, il ne réagit pas à cette valeur. La sensibilité est alors moins bonne que la valeur d'affichage. La précision est en général plus mauvaise que la sensibilité de l'appareil. Pour ramener la précision au niveau de la sensibilité, il faut procéder à un ou plusieurs étalonnages ; mais gare aux dérives dans le temps !

Fidélité. Un capteur peut afficher des valeurs fluctuantes pour une même grandeur à mesurer (dispersion des mesures) ou dériver dans le temps. Si c'est le cas, il n'est pas fidèle. Un capteur mis en place pendant un certain temps pour enregistrer une donnée, ne doit, bien entendu, pas dériver. On corrige les effets de dérive par des étalonnages réguliers.

3.1.2. Température de l'air

a) Choix d'un thermomètre

Les thermomètres utilisables sont de deux sortes, les thermomètres à liquide et les thermomètres électroniques.

Thermomètres à liquide. Les thermomètres à liquide (mercure ou alcool) sont innombrables. Ils sont gradués en général au degré. Mais on peut interpoler facilement au 1/5 °C avec un peu d'habitude. Il faut prendre garde à l'erreur dite de parallaxe qui s'introduit quand on n'est pas bien en face de l'appareil. Certains thermomètres sont protégés par des gaines, mais l'ensemble reste tout de même très fragile. Il faut soigner particulièrement l'emballage pour le transport (on les mettra dans des tubes de gaines électriques en plastique rigide).

Indiquons, par exemple, le thermomètre à mercure ASTM (chez Bioblock réf. C11444) qui couvre la gamme de -8°C à +32°C, possède une bonne précision de 0,1 °C, et coûte 100 €. Mais sa grande longueur le rend très vulnérable.

Thermomètres électroniques. Les thermomètres électroniques à thermistance sont peu coûteux (chez Bioblock réf. C53568, 60 €) mais la précision est limitée à 0,5 °C. On trouve néanmoins de bons thermomètres comme le thermomètre de poche Quick (Bioblock réf.C74946) au prix de 120 € et dont la précision est 0,2°C sur toute sa gamme de -50°C à +200°C. Il ne pèse que 70 g. €

Les thermomètres à fil de platine sont les meilleurs. La précision atteint le 1/10°C pour un prix de l'ordre de 350 €. On atteint la précision de 1/100°C avec des sondes de platine à 4 fils pour un prix de l'ordre de 1000 € (par exemple chez Bioblock réf. C119678 au prix de 950 € environ).

Il existe chez *Dallas Instrument,* des capteurs enregistreurs dénommés *ibutton* qui sont de la taille d'une pièce de monnaie et peuvent enregistrer 2000 valeurs de la température à 0,5 °C près. Ils ne coûtent que 18 € pièce et sont très pratiques à l'usage. Un site internet très bien documenté permet de se tenir à jour (www.ibutton.com). Le logiciel d'exploitation et de commande de l'appareil se télécharge gratuitement sur internet. Leur faible précision ne convient pas pour suivre les températures profondes des réseaux, mais ils sont très intéressants pour détecter le sens du courant d'air (cf. 3-1-8-d).

Enfin, et hors de portée financière des spéléos non professionnels, citons pour mémoire les centrales d'acquisition climatique telles que celle de Campbell-Scientific décrite par A.-S. Perroux (Perroux, 2001) ou à l'occasion de l'étude de la grotte de Moestroff au Luxembourg (Massen, 1997).

b) Vérification d'un thermomètre

Il est possible de faire étalonner en deux points le thermomètre par le vendeur ou le constructeur, ce qui doublera éventuellement le prix de l'instrument. Mais on peut aussi se contenter d'un étalonnage en un point, dans la glace fondante. Pour cela, on prend une bouteille Thermos. On met des glaçons et de l'eau jusqu'à l'équilibre thermique entre l'eau et la glace (attendre une heure pour être tranquille). Si l'eau est pure et qu'il reste des glaçons, la température est alors de 0°C et on plonge le thermomètre pour le vérifier. Là encore, il faut laisser le système se mettre en équilibre thermique.

c) Mise en place d'un thermomètre

Pour mesurer la température d'un courant d'air, le mieux est d'accrocher le thermomètre dans ce courant d'air, d'attendre la stabilisation et revenir faire la lecture cinq minutes plus tard. Le relevé d'une température dans l'air demande des précautions car le temps de mise en température est long et l'opérateur risque de perturber l'indication par sa simple présence. Il faut aussi vérifier que le thermomètre est bien sec.

Pour un thermomètre enregistreur, le problème est différent. Il faut placer le thermomètre à l'abri des regards. Du coup, ces thermomètres ne sont plus dans le courant d'air. Si l'on ne cherche pas à détecter des variations rapides de température, on peut alors installer le thermomètre près d'une paroi. On pourra chercher à isoler le thermomètre de la roche par une couche d'isolant en polystyrène.

De même, pour mesurer en continu la température de l'air extérieur, on installera le thermomètre dans un petit abri ventilé, discrètement accroché dans un arbre. Il faudra veiller en particulier que l'abri ne puisse pas retenir l'eau de pluie dont l'évaporation fausserait les mesures. On se rendra alors compte combien il est difficile de mesurer finement la température moyenne en un lieu ; la présence d'arbres ou non, un léger vallonnement suffisent à modifier cette valeur.

d) Que peut-on faire d'un ensemble de mesures prises le même jour ?

Le relevé le plus simple des températures est celui qu'on peut faire à l'occasion d'une visite de la cavité étudiée. On note d'abord la température extérieure. Puis à différentes stations, d'autant plus rapprochées qu'on est près de l'entrée, on relève la température de l'air. À la sortie, on note à nouveau la température de l'air extérieur. On calcule ensuite sur la topographie la distance à l'entrée et on reporte sur un graphique les différentes températures mesurées. On obtient ainsi un profil en long de la température de l'air le jour de la visite. On a, bien entendu, intérêt à mesurer le courant d'air surtout s'il est aspirant.

Le graphique des températures se présente sous forme d'une courbe qui fournit une distance d'atténuation. On détaillera dans le tome 2 (§ 3.3 et 3.4) cette notion de distance d'amortissement. Le relevé d'un deuxième profil de température pour une saison et une température extérieure très différentes serait très instructive.

À titre d'exemple, nous présentons sur la figure ci-contre deux profils longitudinaux relevés aux Saints de Glace (la deuxième entrée du Trou qui Souffle). Le premier a été relevé le 10 janvier 1999 pour une température extérieure de -0,1°C avec chute de neige et un courant d'air aspirant de 0,8 à 0,9 m³/s. Le deuxième a été relevé (Dominique Dassonville et moi-même) le 31 janvier 1999 pour une température extérieure de -9,0°C et un débit aspirant d'environ 2,3 m³/s. La particularité de ce réseau est qu'un ruisselet de température 5°C arrive à une distance de 35 m de l'entrée et atténue les variations de la température de l'air.

La température extérieure du 31 janvier est basse. Mais elle n'a pas duré assez longtemps pour influencer la température sur une grande distance. On peut estimer cette distance à 200 m. En revanche, la température profonde de la cavité (7,1°C) n'est atteinte qu'au bout de 700 m, qui représente la longueur influencée par les variations annuelles.

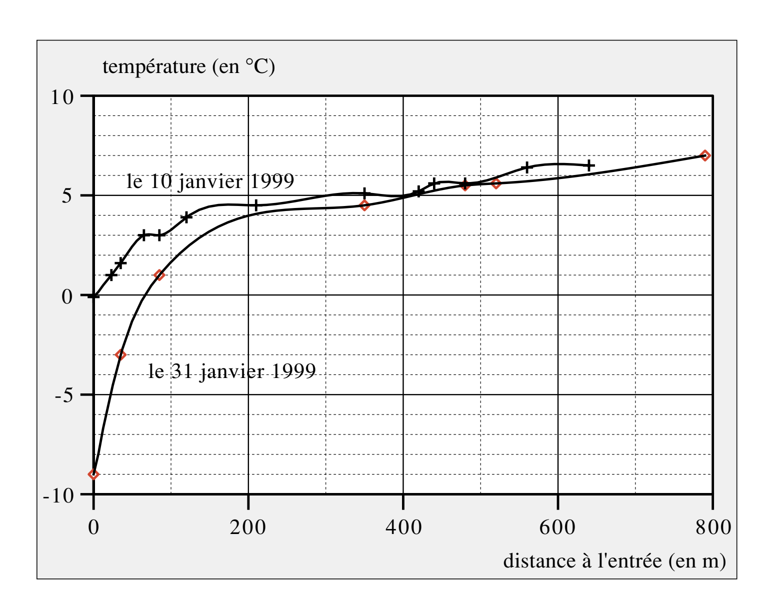


Fig. 3-1- Profil des températures en fonction de la distance à l'entrée des Saints de Glace (Méaudre).
La distance d'amortissement est très petite du fait d'une arrivée d'eau à 5°C à 35 m de l'entrée.
La lente remontée à droite de la courbe provient de la descente de 200 m dans le gouffre

Air temperature versus distance from the entrance in Saints de Glace

À titre de comparaison, le courant d'air sortant des Saints de Glace le 11 septembre 1999 faisait 5,0°C. On verra au deuxième tome qu'une remontée de 200 m en dénivellation s'accompagne d'une baisse de température de 1°C environ, de sorte qu'on aurait pu s'attendre à une température de sortie à la fin de l'été de 6°C et non 5°C. Le soufflage de courant d'air à la température profonde du trou pendant tout l'été n'avait pas permis de récupérer le déficit de l'hiver. Ce déficit de température, cette anomalie thermique, est typique des entrées basses de tube à vent.

e) À quoi peut servir d'enregistrer la température en continu ?

Quand les enregistreurs de température précis passeront en dessous de 150 €, alors de nombreuses mesures de température pourront être faites. Ces mesures permettront, à moyen terme, d'établir un modèle thermique rudimentaire des réseaux souterrains.

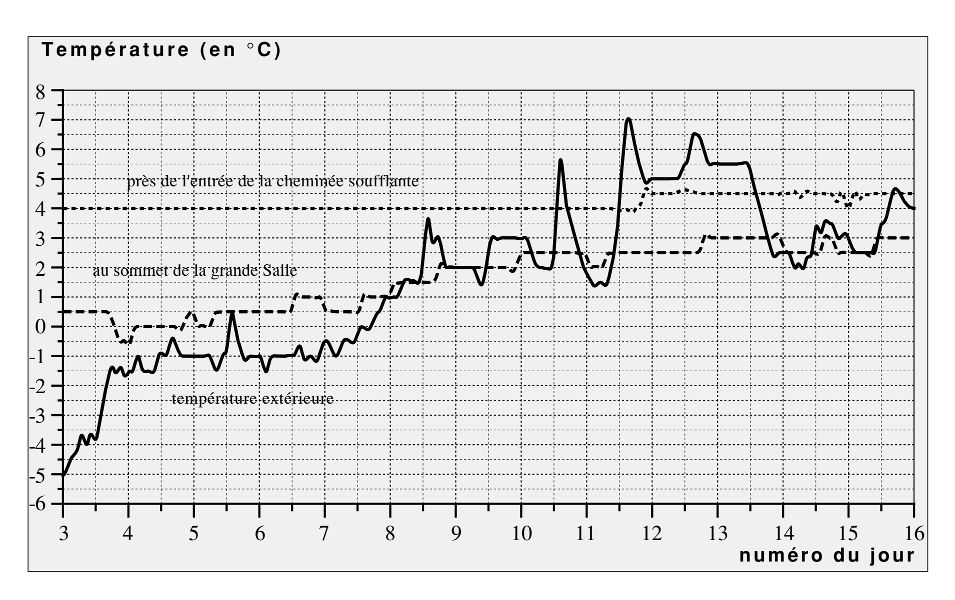
L'enregistrement de la température près d'une entrée de cavité permet de connaître le sens d'un courant d'air. Si la température fluctue, c'est que le courant d'air est aspirant. Si la température est beaucoup plus régulière, c'est que le courant d'air est soufflant (cf. par exemple Birebent 1948 p. 74 et aussi § 3.1.8.e). Si un deuxième capteur a été placé en extérieur et un troisième dans les zones profondes de la cavité, on pourra comparer les températures et déterminer les conditions d'inversion du courant d'air.

De même, un capteur thermique près de l'entrée d'un trou aspirant l'hiver permettra de connaître les périodes de fermeture de l'entrée par la neige, si elle est susceptible d'être bouchée. À ces périodes là, le thermomètre ne réagira plus, alors que la température extérieure chutera.

Une cavité qu'on soupçonne d'être un piège à air froid montrera une température bien uniforme l'été, mais pas du tout l'hiver.

Fig. 3-2- Mesure de la température à la grotte de la Ture à l'aide de trois capteurs *ibutton* de Dallas Instrument (cf. aussi § 3.2.3). Malgré la faible sensibilité, on note l'influence sur la salle, des basses températures extérieures

Temperatures measurment at grotte de la Ture with 3 Dallas ibuttons



3.1.3. Mesure de la pression de l'air

La pression de l'air se mesure à l'aide de baromètres. Les plus pratiques sont les altimètres qui fournissent la pression atmosphérique (ils ne fournissent l'altitude que si on les étalonne à l'aide d'un point connu). La pression est exprimée en Pa (ou en hPa = 100 Pa qui correspond à l'ancienne unité du millibar). Un mètre de dénivellation sur l'altimètre correspond à peu près à 10 Pa soit la surpression frontale donnée par un vent de 4,5 m/s. Les meilleurs altimètres sont sensibles à 1 m de dénivellation, ils pourraient servir d'anémomètre rustique pour de très violents courants d'air.

L'utilisation de l'altimètre dans une cavité est sujette à caution, principalement à cause des variations de la pression atmosphérique. Il vaut mieux une bonne topographie. Néanmoins, il est possible de l'utiliser correctement à condition de disposer d'un deuxième altimètre extérieur relevé régulièrement. La correction est alors évidente à faire.

Pour l'étude de la respiration des cavernes, on aura besoin d'un enregistrement sur plusieurs jours. Mais la difficulté d'étudier ce phénomène réside dans l'obligation pour mesurer la vitesse, de laisser un anémomètre enregistreur au beau milieu d'une galerie. Il vaut bien mieux, dans ce cas, utiliser un manomètre différentiel.

L'installation d'un manomètre différentiel de part et d'autre d'une étroiture permet de déterminer sans anémomètre la vitesse de l'air. Mais la sensibilité de ce manomètre (à deux prises d'air) doit être très grande. En effet, un courant d'air de 0,5 m/s dans l'étroiture engendrera une perte de charge (chute de pression) égale à 0,1 Pa environ, ce qui est très peu. On peut citer les mesures à la grotte de Mœstroff au Luxembourg faite avec un capteur différentiel (Setra de General electric) sensible à 0,01 Pa, mais pas fidèle. On trouvera sur internet (www.setra.com) des renseignements intéressants sur ces capteurs. La baisse régulière des prix laisse espérer dans un proche avenir le développement de ces méthodes.

3.1.4. Mesure de l'humidité de l'air

L'humidité de l'air caractérise la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'air. On distingue l'humidité spécifique qui est la masse de vapeur d'eau contenue dans un kg d'air sec et l'humidité relative qui est la pression partielle de la vapeur d'eau de l'air divisée par la pression de vapeur saturante. On trouvera dans le tome 2 (§ 1.1.4) les relations de passage d'une grandeur à l'autre.

a) Appareils pour mesurer l'humidité d'un courant d'air

Il n'existe pas d'appareil bien adapté aux conditions des grottes. En effet, les capteurs capacitifs sont très pratiques et peu coûteux, mais craignent la saturation, c'est-à-dire que les appareils sont à re-étalonner quand de la condensation s'est déposée sur le capteur. Ce défaut est prohibitif pour les grottes.

Les capteurs à cheveux sont peu sensibles. Mais des réalisations soignées permettent néanmoins des mesures assez correctes avec une précision de l'ordre de 5%. Leurs prix sont abordables (thermohygromètre certifié chez Bioblock C54103 à 100 €).

Pour des mesures plus précises, il reste les psychromètres basés sur l'évaporation de l'eau en présence d'un courant d'air. Le refroidissement est d'autant plus grand que le taux d'humidité est plus faible. La comparaison de la température dite humide avec la température «sèche» permet de trouver ce taux d'humidité. On en trouve un transportable à 840 € (C99596 chez Bioblock) qui pèse tout de même un kilogramme.

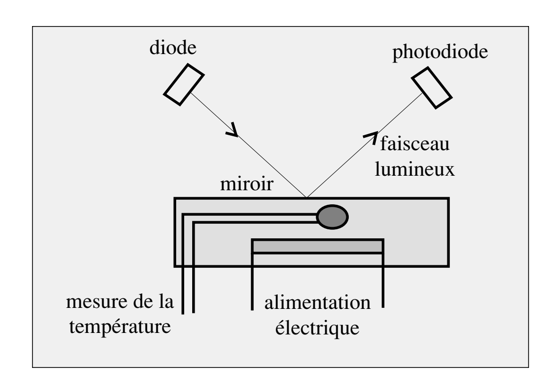


Fig. 3-3- Principe de la mesure de la température de rosée de l'air

Principle of air dew-point temperature

Le meilleur appareil dont je ne connais pas de version vraiment transportable est celui qui permet de mesurer la température de rosée de l'air.

Le principe en est simple. Le pinceau d'une diode émettrice est réfléchi sur un miroir et le signal optique est reçu par une photodiode. Le miroir est placé dans l'air à mesurer. On met en mémoire la température du miroir. Puis, on refroidit le miroir progressivement par effet Peltier. Quand la température atteint la température de rosée, un brouillard se dépose sur le miroir et le faisceau lumineux est interrompu. Ce qui déclenche l'affichage de la température du miroir. On a donc la température de rosée de l'air et la température de l'air (dite température sèche). Ces deux données conduisent à la valeur de l'humidité spécifique (cf. tome 2). Ce système est très bien adapté aux grandes humidités relatives qu'on trouve dans les grottes. Des appareils transportables de ce type existent-ils dans le commerce ?

b) Que déduire de ces mesures ?

Le relevé de l'hygrométrie de l'air près d'une entrée aspirante et le long de la galerie permettrait, associé aux mesures de températures, de tester des lois d'échanges thermiques (chaleur sensible, chaleur latente). Aucune corrélation n'a encore été proposée pour des cavités naturelles sur des bases expérimentales. Bien entendu, la corrélation ne serait valable que pour un type de conduits comparable à celui mesuré, et une topographie soignée devrait accompagner les mesures. L'humidité des parois devrait être notée elle aussi. Tout un champ d'investigations, très importantes pour la modélisation du karst, s'offre ainsi au chercheur. On a tout de même intérêt à sélectionner soigneusement sa cavité pour ne pas se heurter à des difficultés considérables d'interprétation des mesures.

3.1.5. Mesure du dioxyde de carbone

a) Les appareils

Les détecteurs à cellules chimiques comme les détecteurs Draeger (Dräger) sont précis mais coûteux à l'utilisation puisqu'ils nécessitent une cellule par mesure (Gaïa, 1967). On trouvera les caractéristiques de ces appareils sur le site internet www.draeger.com. Il faut compter 1200 € pour l'analyseur et 6 € par cellule chimique.

Les appareils actuellement les plus pratiques sont les analyseurs de CO_2 à infrarouge (par exemple, chez Testo : www.testo.be, ou chez Dräger, Reval strasse 1, D-23560 Lübeck). Le principe de fonctionnement repose sur la propriété du dioxyde de carbone d'absorber une certaine longueur d'onde dans l'infrarouge (raie caractéristique). Ces appareils sont assez coûteux (plus de 1000 €).

Plage de mesure. La gamme des concentrations mesurables doit s'étendre de 300 ppm (0,03%) à 70 000 ppm (7%). La première valeur correspond à la concentration du CO_2 dans l'atmosphère. La deuxième correspond aux maxima mesurés dans des grottes avec dioxyde de carbone. On trouve en effet, en Ardèche et dans le Lot, des cavités dont la teneur en dioxyde de carbone atteint 7% (Renault, 1980).

Précision. Pour la simple mesure de la teneur en CO_2, une précision de 0,2 à 0,5 % suffit. Mais pour l'usage que nous proposons plus loin de la détermination de la dispersivité, il faudrait une précision de 50 à 100 ppm.

b) Intérêt des mesures de CO_2 dans les cavités

1- Répartition du CO_2 dans une cavité

La présence de dioxyde de carbone en concentration plus grande que la concentration atmosphérique dans les grottes est due principalement à l'apport biologique au niveau du sol. Ce gaz, grâce à ses propriétés de dissolution dans l'eau, multiplie les possibilités de creusement chimique des cavernes. La connaissance du cycle annuel de concentration et des lieux de répartition suivant la végétation et les sols, est un des ingrédients d'une modélisation temporelle d'un karst. Peu de mesures suivies ont été faites et tout reste à peu près à faire en ce domaine. Nous reviendrons en détail sur ces questions dans le tome 2 (§ 4.5). Pour se familiariser avec le sujet, la publication de Philippe Renault dans Spéléo Dordogne rendra de grands services (Renault, 1980).

La vitesse de creusement est liée à la concentration maximale en ions calcium que peut atteindre une eau agressive. Les lois de la cinétique chimique montrent que la vitesse de creusement est sensiblement proportionnelle à la différence entre la teneur en ions calcium maximale et celle au loin dans l'écoulement, et cela tant que la teneur en ion calcium est assez loin du maximum. Près de l'équilibre, la vitesse de réaction est diminuée suivant des lois complexes (cf. tome 2, § 1.6.3 et 4.5.2).

La teneur maximale en calcium varie *grosso modo* comme la puissance un tiers de la pression partielle de CO_2 équilibrante. Il est donc important de connaître en fonction du sol sus-jacent et de la saison, les concentrations en CO_2 que l'on rencontre dans l'air des cavernes. Cette concentration nous fournit la pression de CO_2 équilibrante.

Les mesures devront se faire à différentes époques de l'année et pour différentes conditions de niveaux d'eau.

Matériel nécessaire : thermomètre, anémomètre portable, détecteur de CO_2 à infrarouge.

2- Mesure de la dispersivité des écoulements naturels

Elle se fera par une injection ponctuelle de CO_2 dans une galerie, associée à un analyseur de CO_2.

Généralités. L'étude des courbes de restitution à l'issue d'un traçage dans une nappe phréatique permet de remonter à des caractères globaux de la nappe comme la porosité. En revanche dans les conduits karstiques, la courbe de restitution, qui est systématiquement produite, ne conduit à aucune conclusion intéressante pour le spéléo. En réalité, il manque des études théoriques et expérimentales sur le sujet. Faire des mesures dans l'air est bien plus facile que dans un réseau noyé. Ainsi, une telle étude permettra de fournir des éléments expérimentaux sur des écoulements en milieux noyés.

Mode opératoire. On injecte en un point d'une galerie avec courant d'air une quantité de CO_2 connue de telle manière que la concentration de CO_2 atteigne à l'instant initial 2 ou 3 %. Bien s'assurer que la teneur ne peut pas dépasser cette valeur ! On mesure à une certaine distance la concentration au cours du temps. Et on refait la manipulation à différentes distances.

Ces mesures permettront de voir l'évolution d'un nuage de contaminant. En particulier, la dispersivité augmente-t-elle avec la distance à l'injection ? Elles permettront aussi de voir la diminution du CO_2 par adsorption sur les surfaces humides des galeries.

Matériel nécessaire : anémomètre portable, détecteur de CO_2 à infrarouge, bouteilles de CO_2 comprimé.

3- Utilisation de l'analyseur de CO_2 pour mesurer un débit de courant d'air

Si on dispose d'une source de CO_2 continue pendant un temps assez long, il est possible de mesurer le taux de dilution en se mettant en aval en un point où le mélange a eu le temps de se faire. Connaissant le débit de CO_2 injecté, on en déduit le débit du courant d'air. On pourra comparer ces mesures avec les résultats obtenus à l'aide d'un anémomètre. Cette méthode est l'équivalente de celle utilisée pour mesurer le débit des torrents.

Matériel nécessaire : détecteur de CO_2 à infrarouge, bouteilles de CO_2 comprimé.

3.1.6. Mesure du monoxyde de carbone

Le monoxyde de carbone est le principal gaz nocif produit par les dynamitages. Le processus de dispersion de ce gaz dans un courant d'air est le même que pour les autres gaz de dynamitage. Des expériences de mesures dans un nuage transporté et dispersé dans un courant d'air permettront de fournir un modèle prédictif de dispersivité et donc de fournir des tables pour la sécurité lors d'opération de secours ou autre. Ce modèle prédictif présenterait aussi un grand intérêt scientifique.

L'utilisation de perceuses thermiques (du genre Ryobi) suppose qu'un courant d'air est suffisant pour entraîner les gaz dangereux (CO). La présence d'un détecteur de CO peut renseigner, lors d'une opération de perçage avec courant d'air faible, sur la présence de courants de retour ramenant les gaz toxiques près de l'opérateur.

Vu le faible coût des détecteurs de CO, il ne faut pas hésiter à acquérir un tel détecteur si on a l'habitude de procéder à des tirs pour les explorations ou les secours. Son prix est de l'ordre de 100 €. La fiabilité non garantie de ce genre d'appareil impose d'être très prudent et d'adopter de grandes marges de sécurité.

3.1.7. Mesure des taux d'oxygène et d'azote

Le CO_2 qu'on retrouve dans l'atmosphère peut avoir plusieurs origines. Il peut venir de la combustion ou de l'oxydation par les bactéries de matières organiques. Il peut venir d'émanations profondes ou autres. Discriminer entre les différentes origines est important. Il est donc nécessaire de mesurer, en plus du dioxyde de carbone, la teneur en oxygène de l'air. Une augmentation de pression partielle de CO_2 s'accompagne, dans le cas d'une oxydation, d'une diminution identique de la pression partielle de l'oxygène. Un analyseur d'oxygène est donc le complément naturel à un détecteur de CO_2.

On trouve chez Bioblock un analyseur agréé Cerchar, vers 530 € (poids 95 g ; gamme de mesure 0-30% ; précision de 0,1%). On fera au tome 2 § 4.3.6 une analyse systématique du phénomène.

3.1.8. Mesure de la teneur en radon

Des mesures suivies du radon dans les cavités qui en contiennent permettraient de déterminer le taux de renouvellement de l'air de la grotte. L'interprétation fine des résultats sera néanmoins rendue délicate par la courte demi-vie du radon.

Par ailleurs, le radon étant cancérigène, il serait souhaitable que les Comités de spéléos fassent quelques mesures pour repérer les trous potentiellement dangereux. On peut trouver sur internet toutes les indications, car le sujet est d'actualité (taper *radon* sur les moteurs de recherche). D'autres renseignements dans le tome 2, § 1.1.3.b.

La société Dosirad (rue Lech Walesa, 77185 Lognes) commercialise des dosimètres à rayons alpha qui permettent de mesurer la teneur en radon. Ils coûtent aux alentours de 25 €. Il s'agit d'un film, de la taille d'une carte de crédit, qui enregistre l'impact des rayons alpha et qu'on laisse de quelques semaines à quelques mois dans le lieu à étudier. L'analyse du film consiste à augmenter la trace des impacts et à faire un comptage. L'analyse est comprise dans le prix du dosimètre.

3.1.9. Vitesse de l'air, intensité turbulente

a) Mesure de la vitesse d'un courant d'air à vue

Il est rare qu'on se promène sous terre avec un anémomètre. En l'absence d'appareil, il est tout de même possible d'estimer la vitesse d'un courant d'air. Le mieux est d'opérer à deux, mais seul, on y arrive aussi. L'un des opérateurs se met dans le courant d'air perpendiculairement au courant et souffle une bouffée d'air. Le deuxième opérateur observe le panache de brouillard du souffle (ou la fumée d'une cigarette) et compte les secondes mentalement. Avec ses mains écartées, il reproduit la distance parcourue en une seconde (plusieurs mesures si nécessaire). Il est facile de mesurer avec la main (empan) cette distance (en m). La vitesse est donc cette distance par seconde. Cette méthode simple (simpliste) ne fonctionne bien que si la vitesse est comprise entre une dizaine de cm/s et 1 m/s et si le conduit est bien horizontal.

Il est illusoire de mesurer un courant d'air dans un conduit présentant une inclinaison (cf. § 2.C-10). Dans un conduit de section variable et un fort débit de courant d'air, ce n'est pas forcément dans les resserrrements qu'on fera les meilleurs mesures. Il faut choisir un endroit avec une vitesse de l'ordre du mètre par seconde.

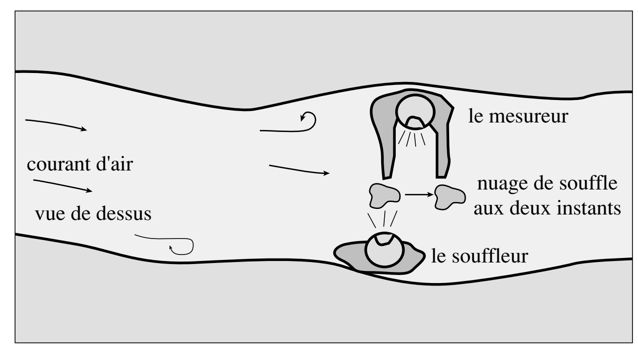


Fig. 3-4- Estimation de la vitesse d'un courant d'air en soufflant et en comptant dans sa tête

Air velocity estimation

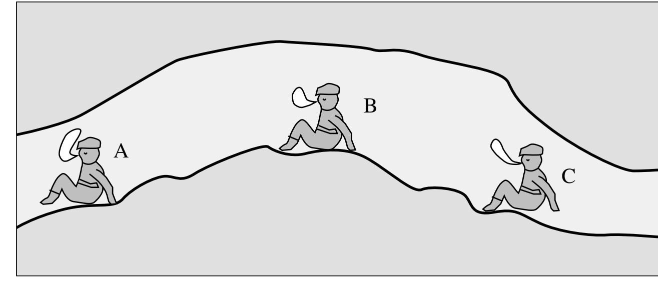


Fig. 3-5- Attention de détecter les courants d'air dans un tronçon horizontal !
Les points A et C sont incorrects, la convection naturelle engendrée par le spéléo perturbe la mesure
La position B est correcte, le courant d'air est perpendiculaire à la convection

Air flow detection and measurement are to be made in the horizontal gallery

b) Mesure d'un courant d'air à l'encens

Certaines fois, il est difficile d'estimer la vitesse du courant d'air. Par exemple un courant d'air qui n'est pas à 100 % d'humidité ne permet pas de former un léger brouillard avec son souffle. Ou bien, si la vitesse est supérieure à 1 m/s, il est difficile de faire une mesure directe. On peut alors utiliser une méthode indirecte avec un bâtonnet d'encens. La méthode nécessite deux opérateurs. L'un se met en amont du courant d'air et allume le bâtonnet. L'autre situé plus en aval, mesure le temps au bout duquel il sent l'odeur du bâtonnet. La vitesse se déduit du rapport de la longueur L et du temps t. On peut ensuite appliquer la relation au-dessus.

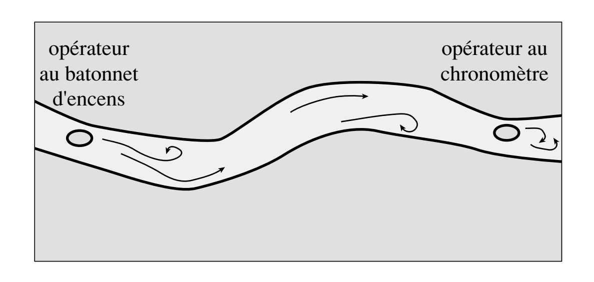


Fig. 3-6- Principe de détermination de la vitesse à l'encens.
On mesure le temps pour l'arrivée de l'odeur

Air velocity determination with incense

La deuxième méthode fournit souvent une vitesse plus grande que la première. Cela provient du fait que certains filets fluides vont plus vite que la vitesse moyenne et ce sont ces filets qui fournissent la première odeur.

Comme dans tout traçage, le temps de parcours de la distance par les molécules de traceur est représenté par une distribution appelée distribution des temps de séjour. Le temps qu'il faut essayer d'estimer est non pas celui de la première odeur mais un temps moyen du nuage d'encens.

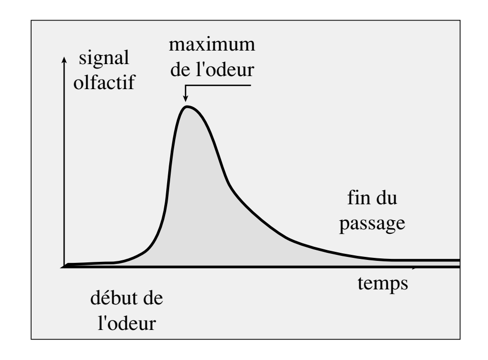


Fig. 3-7- Courbe de restitution d'un traceur (encens)
La vitesse moyenne correspond au temps d'arrivée du maximum du signal

Restitution curve of tracer : concentration versus time

Cette méthode pour mesurer la vitesse est facile à mettre en oeuvre, mais il est conseillé d'utiliser un tronçon de section quasi uniforme et de choisir une longueur telle que l'odeur met une minute à parcourir la distance L. Il est conseillé pour mesurer le débit d'utiliser les deux méthodes par précaution.

Si on dispose à une certaine époque d'un anémomètre, on peut s'en servir pour s'étalonner et vérifier sa mesure. Mais l'expérience montre que la précision obtenue avec les méthodes décrites au-dessus, est tout à fait acceptable. Même des mesures entachées d'un biais systématique peuvent servir, par exemple, si on se contente de vérifier qu'on garde tout le débit dans la galerie qu'on est en train d'explorer.

c) Les anémomètres du commerce pour la mesure de la vitesse de l'air

La gamme des vitesses à mesurer correspond à celle qu'on rencontre dans les gaines de climatisation, c'est-à-dire la gamme 0 à 10 m/s. Les anémomètres doivent pouvoir mesurer de faibles vitesses à partir de 0,1 à 0,2 m/s. Ils sont en général thermiques ; par exemple, le capteur est un élément maintenu à une température un peu supérieure à celle de l'air à mesurer. La puissance nécessaire pour maintenir la température dépend de la vitesse. Tout cela est fait dans l'appareil qui affiche la vitesse en m/s. Les prix baissent régulièrement.

Chez Bioblock (tél 03 88 67 14 14 à Illkirch), on trouve un anémomètre thermique à sonde intégrée (C62907) dans la gamme 0 à 10 m/s affichant le cm/s, et la température au degré près, au prix de 380 €. En mettant 550 €, on peut passer à un anémomètre thermique (C62908) offrant une gamme de vitesse de 0 à 20 m/s et avec une sonde télescopique permettant de faire des mesures partout. Le plus bas prix chez ce revendeur concerne un anémomètre à sonde thermique de la marque allemande Testo (C58603) pour une gamme de mesure de 0 à 20 m/s, qui affiche le dm/s et la température au degré près et coûte 180 €. C'est cet appareil que j'utilise avec satisfaction. Ces appareils sont fragiles mais ils sont parfaitement transportables car leur masse est de l'ordre de 300 g.

Il existe des appareils plus sophistiqués. Par exemple le «collecteur vitesse d'air/humidité/température» (C63704 toujours chez Bioblock) permet de mesurer les trois paramètres vitesse de l'air, humidité, température et de mémoriser 7500 valeurs prises à intervalles réguliers. On vide les mémoires dans un ordinateur. Malheureusement l'ensemble dépasse les 3000 €.

d) La détermination du sens d'un courant d'air par un enregistrement de la température à l'entrée

Si l'on dispose d'un enregistreur de température dans une entrée ventilée d'un tube à vent, il est facile de déduire à partir de l'aspect des températures si le courant d'air est entrant ou sortant. En effet, la température profonde d'un réseau est beaucoup plus stable que la température extérieure.

La figure ci-contre représente schématiquement la température à une entrée basse d'un tube à vent. La température est assez stable quand le courant d'air est soufflant, alors qu'un courant d'air aspirant plus froid que la température profonde du réseau se signale par les pointes vers le bas. Inversement à l'entrée haute d'un tube à vent.

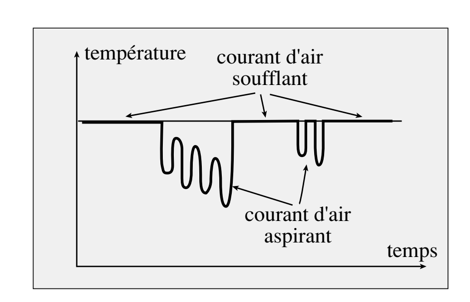


Fig. 3-8- La température de l'air fournissant le sens du courant d'air

Air velocity direction determined by two air temperature recordings (external and internal)

Un manomètre différentiel fournirait lui-aussi le sens de la vitesse (cf. 3.1.3).

3.2. Grandeurs intégrées sur une section

3.2.1. Température moyenne de mélange

La température de l'air dans une section donnée de galerie n'est pas uniforme. La présence des parois, surtout près des entrées, modifie la température de l'air au voisinage. On verra dans le deuxième tome que la température à prendre en compte dans les bilans thermiques est la température moyenne de mélange qui est une moyenne des températures dans la section, moyenne pondérée par les vitesses. Il faut donc mesurer des profils de températures et de vitesses et faire une intégration numérique. La détermination expérimentale de cette température n'est donc pas commode. Aussi, on pourra sans commettre une grosse erreur, considérer le plus souvent que cette température est la température au milieu de la section. Cette approximation est toujours faite par les expérimentateurs.

3.2.2. Mesure d'un débit volumique et massique d'air

a) Mesure du débit d'un courant d'air à un rétrécissement

Il ne faut surtout pas essayer de mesurer un courant d'air juste après un virage. Un tourbillon de recirculation existe en général, sans compter le tourbillon torique associé au changement de direction (cf. § 2.B-18).

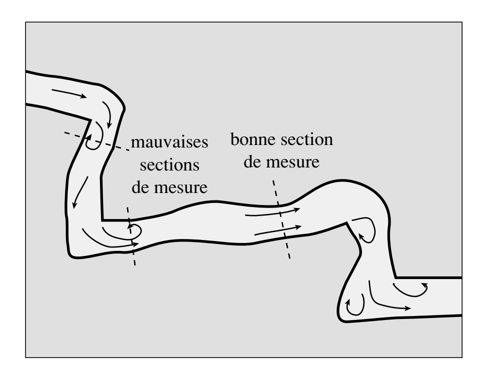


Fig. 3-9- Bonne et mauvaises sections pour mesurer un courant d'air

Bad measuring in a bend, good in a narrow passage

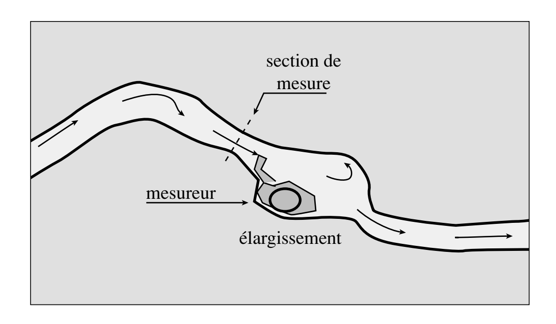


Fig. 3-10- Mesure après un rétrécissement

Measure of flow rate after a narrow passage

b) Calcul rapide du débit d'un courant d'air

La méthode est simple, un débit (en m^3/s) c'est le produit d'une vitesse moyenne (en m/s) par une section de passage (en m^2). Il y a donc deux mesures à faire : la vitesse d'abord (voir au-dessus) et la section ensuite.

Pour mesurer la section, on utilise la main comme unité (empan) ou le bras écarté (brassée) ou le pas. La section s'obtient comme le produit de la largeur par la hauteur ou par estimation. On doit la compter en m^2. Le débit s'obtient par le produit des deux nombres mesurés. Comme la vitesse a été mesurée au milieu à l'endroit où elle est la plus grande, on a intérêt à appliquer un facteur de réduction pour calculer la vitesse moyenne. On pourra prendre 0,7 ou 0,8 (0,7 si la paroi est très compliquée, 0,8 si la paroi est plus régulière).

$$q = 0{,}7 \cdot U \cdot S \quad \text{avec} \quad q \text{ en } m^3/s, \quad U \text{ en m/s et } \quad S \text{ en } m^2$$

c) Calcul précis d'un débit à partir des vitesses

On peut trouver plusieurs méthodes dans le mémento technique n°7 du Centre de géotechnique et d'exploitation du Sous-sol, laboratoire associé à l'école des Mines de Paris.

Un débit volumique (en m^3/s) est le produit d'une section de passage (section transversale de la galerie) multipliée par la vitesse moyenne. Pour mesurer la section, le plus précis est de prendre une photo avec un éclairage en tranche et un étalon de longueur au milieu de la photo (cf. Tarrisse, 1998) et de mesurer la section sur le tirage photo grâce à un planimètre. On peut aussi représenter la section de la galerie au moyen de quelques mesures et déterminer la surface par la méthode des petits carreaux (on compte les carrés de 1 mm de côté sur le papier millimétré ou bien on pèse la section découpée dans une feuille de papier et on la compare à la masse d'une feuille complète). La connaissance de l'échelle de la figure conduit à la surface.

Le deuxième paramètre est la vitesse moyenne. On a vu que la vitesse est maximale vers le centre de la galerie et qu'elle s'annule sur les bords. Si la galerie a une section très simple, on peut adopter la méthode suivante qui consiste à faire 5 mesures de vitesse, l'une au centre et les quatre autres à 1/4 de la distance à la paroi.

$$U_m = 0{,}4\ U_1 + 0{,}125\ (U_2 + U_3 + U_4 + U_5)$$

Une méthode plus adaptée aux galeries irrégulières des réseaux souterrains naturels est la méthode polaire (revue de l'Industrie Minérale 15/7 1962, ch. 4, p. 172). Elle consiste à dessiner trois courbes semblables au contour dont les distances à partir du centre valent respectivement R/2, 3R/4, 9R/10. On mesure la moyenne sur chacun de ces contours en faisant plusieurs mesures, puis on applique la relation :

$$U_m = 0{,}07\ U_4 + 0{,}3\ (U_1 + U_2 + U_3)$$

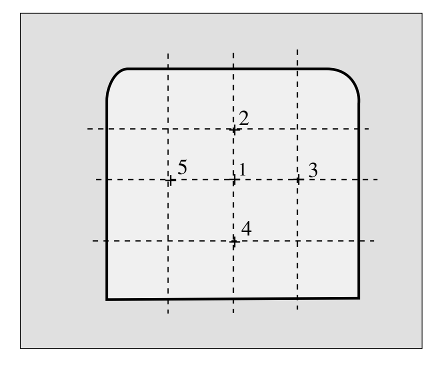


Fig. 3-11- Mesure du débit à l'aide de 5 mesures de vitesse

Flow rate determination with 5 velocity measures

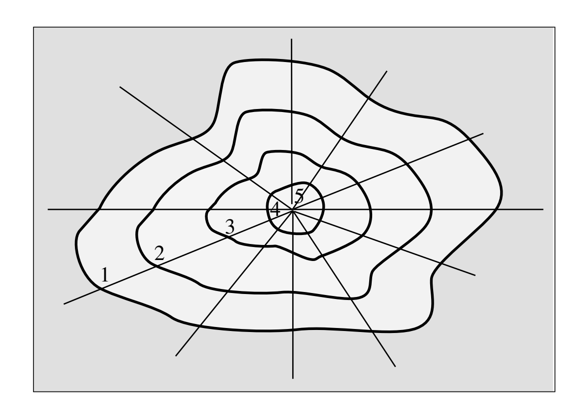


Fig. 3-12- Mesure du débit par la méthode des rayons

Flow rate measuring with the radius method

Souvent, on n'est pas à même de faire des mesures aussi soignées. Dans ce cas, prendre la vitesse au centre en la multipliant par 0,7 ou 0,8 donne des résultats suffisants.

d) Une méthode sur tableur pour calculer surface et débit

Dans nos études, nous avons personnellement utilisé la méthode suivante. Le dessin des sections est reporté sur du papier millimétré à l'échelle du 1/50e, c'est-à-dire qu'un centimètre sur la feuille représente 50 cm sur le terrain.

Nous quadrillons les sections avec des carreaux de 0,5 cm de côté (soit 25 cm sur le terrain). Les lignes sont numérotées de 1 à 13 et les colonnes de A à P (maillage adapté à la plus grande section mesurée). Ce quadrillage est transposé sur le tableur, chaque carreau étant représenté par une cellule du tableau. Le dessin des cellules reproduit ainsi *grosso modo* le dessin des coupes transversales.

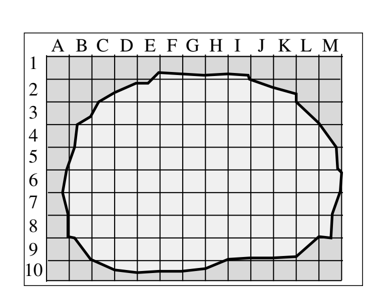
Nous reportons dans les cellules d'un premier tableau la valeur de 0 à 1 traduisant la proportion de section occupant le carreau. Si tout le carreau correspond à la galerie, nous mettons 1. Si une proportion r est occupée, nous entrons r. Au bas de chaque colonne, nous calculons la somme des surfaces (somme des cellules mutipliée par 1/16 m^2, correspondant à la surface d'un carreau), et au bout de la ligne des sommes partielles, la somme totale des surfaces (en m^2) qui représente la surface transversale de la galerie.

De même, nous reportons dans un deuxième tableau, la vitesse mesurée en m/s. Les cellules pour lesquelles nous n'avons pas de mesures, sont remplies par interpolation en tenant compte de l'existence de couches limites près des parois (on aura intérêt à relever un profil transversal des vitesses sur le terrain pour affiner ce stade du travail). Au bas de chaque colonne, nous faisons la somme des produits des surfaces (obtenues dans le premier tableau) par la vitesse correspondante, ce qui nous donne le débit partiel du courant d'air. Au bout de la ligne des débits partiels, est calculé le débit total (en m^3/s).

Nous donnons ci-après un exemple, pris au Trou qui Souffle de Méaudre, de mesure des vitesses et de calcul du débit pour une section le 16 janvier 2000, 50 m au sud du Balcon de la Cuspide sur le trajet de la galerie de Pâques (régime hivernal aspirant, température extérieure -7°C, température profonde du trou +7°C).

Fig. 3-13- Section de la galerie dessinée et découpée suivant un maillage carré pour un calcul sur tableur

Gallery section drawn and meshed for flow rate computing



Calcul de la surface de la section transversale de la galerie

Tab.1- La forme de la section de galerie
et valeur de la surface $S = 5{,}53\ m^2$

Tranverse section of gallery

0	0	0	0	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
0	0	0,2	0,7	0,9	1	1	1	1	0,9	0,5	0	0
0	0,1	0,9	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0
0	0,7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,4
0	0,9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,9
0,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,8
0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5
0	0,4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0,5	0
0	0	0,3	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0	0	0	0	0
0,01	0,32	0,46	0,52	0,53	0,54	0,54	0,52	0,51	0,49	0,47	0,38	0,23

Calcul du débit du courant d'air, sur la même page du tableur, au-dessous de l'autre.

Tab. 2- Les vitesses dans chaque maille
et le débit total $q = 2{,}98\ m^3/s$

Velocity in each mesh
and the total volume rate of flow

0	0	0	0	0,05	0,1	0,1	0,1	0,1	0	0	0	0
0	0	0,1	0,1	0,5	0,51	0,5	0,4	0,4	0,3	0,2	0	0
0	0,1	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,5	0,2	0
0	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,6	0,2
0	0,5	0,63	0,63	0,6	0,6	0,7	0,7	0,7	0,7	0,61	0,6	0,4
0,1	0,6	0,63	0,63	0,65	0,61	0,7	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,5
0,1	0,6	0,63	0,63	0,65	0,6	0,7	0,6	0,6	0,61	0,6	0,6	0,4
0	0,5	0,6	0,5	0,651	0,65	0,6	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,2
0	0,2	0,4	0,4	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4	0,2	0,2	0,5	0
0	0	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,2	0	0	0	0	0
0,01	0,16	0,25	0,26	0,31	0,31	0,32	0,30	0,29	0,25	0,24	0,20	0,09

e) Relation entre débit et vitesse maximale à un rétrécissement

La mesure des vitesses en plusieurs points d'une section est assez longue. Il pourrait être utile de connaître une relation fournissant le débit alors qu'on n'a fait qu'une seule mesure de vitesse (à l'endroit où on s'attend à avoir la vitesse maximale). L'idée que cette relation existe repose sur le fait que la mesure est faite systématiquement à un rétrécissement et que le profil de vitesse doit y être plus simple qu'ailleurs. Ce fait est d'ailleurs utilisé dans la construction d'une veine d'essai en aérodynamique. Au § 3.2.2.b, nous avons admis un coefficient 0,7 ou 0,8.

Dans ce chapitre, nous allons proposer une relation expérimentale un peu plus précise, entre le débit d'une part et les trois valeurs (section, périmètre, vitesse maximale) d'autre part.

On comprend intuitivement que la différence entre une conduite industrielle et une galerie de grotte réside dans l'irrégularité des parois. Les études ont montré que dans le calcul des pertes de charge, ce n'est pas le diamètre équivalent, diamètre du cercle fournissant la même surface qui intervient, mais le diamètre qu'on nomme diamètre hydraulique. La distance de la forme de la galerie à un cercle parfait peut être représentée par la grandeur que nous appelons élancement de la section de la galerie. C'est le rapport entre le diamètre équivalent (qui donne la même section) et le diamètre hydraulique qui donne la même perte de charge. La relation s'écrit (P est le périmètre) :

$$\text{Élancement} = E = \frac{\sqrt{\dfrac{4\,S}{\pi}}}{\dfrac{4\,S}{P}} = \sqrt{\frac{P^2}{4\,\pi\,S}}$$

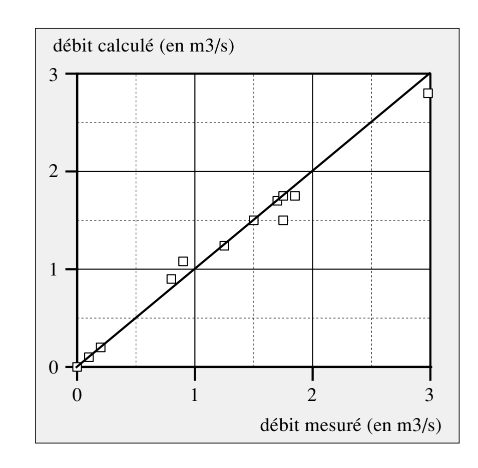


Fig. 3-14- Comparaison de l'expression empirique trouvée pour le débit, avec le débit mesuré

Computing volume rate of flow from velocity at the axis of gallery, versus measured flow rate

Une séance de mesures de débit au Trou qui Souffle de Méaudre le 16 janvier 2000 nous a permis de rechercher une relation empirique exploitable faisant intervenir l'élancement. L'étude des débits expérimentaux conduit à l'expression suivante : $q = (0{,}78 - 0{,}055\ E)\ U_{max}\ S$, que nous avons représentée sur la figure ci-contre en fonction des débits déterminés par intégration sur tableur.

Exemple de détermination des débits au Trou qui Souffle

Les mesures ont été faites le 16 janvier 2000 alors que la température extérieure était de -7°C (stable dans la journée) et que la température intérieure avoisine les +7°C. La détermination des débits en différentes sections clés du Trou qui Souffle avait pour but de repérer les fuites de courants d'air, donc les suites possibles du réseau.

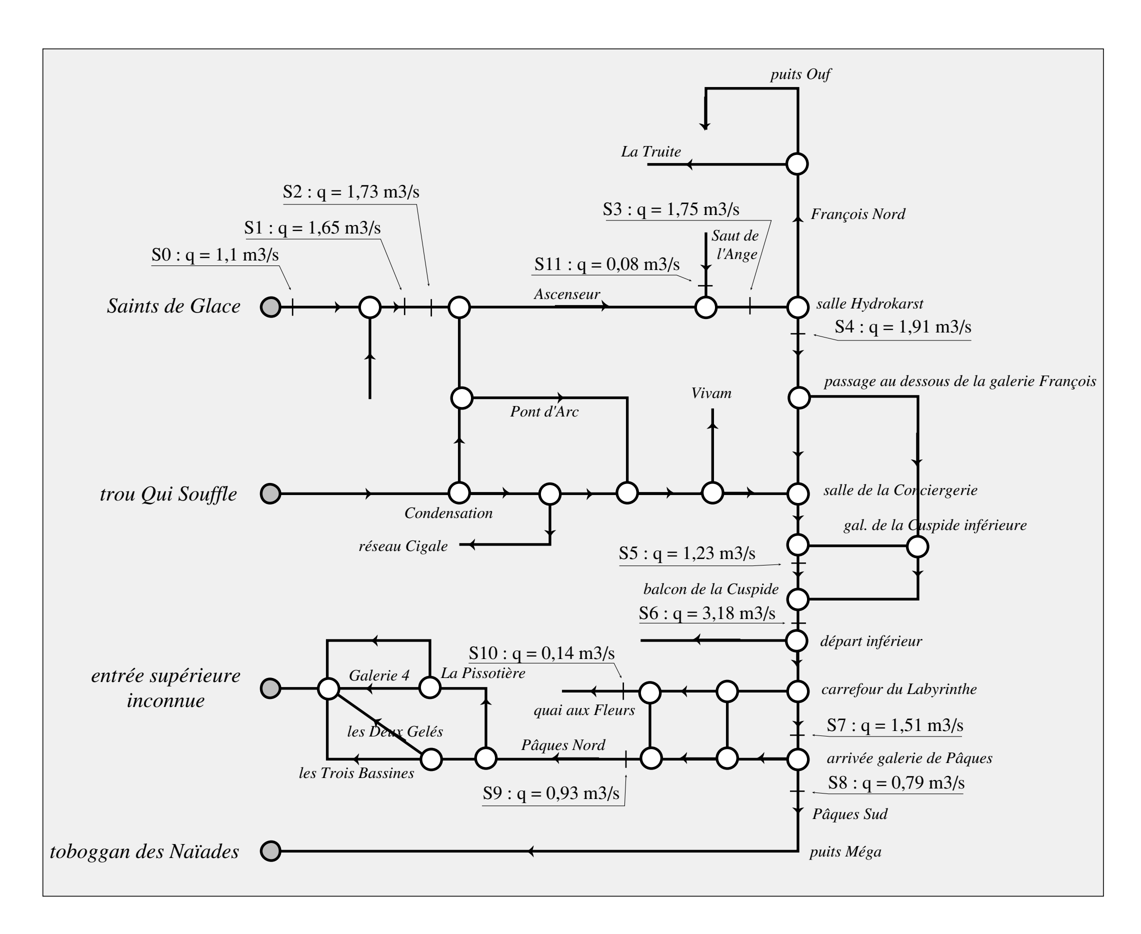


Fig. 3.15- Le Trou qui Souffle de Méaudre sous une forme schématique avec les différents débits de courant d'air le 16 janvier 2000

Sketch of Trou Qui Souffle with different flow rates of air on the 16/01/2001

L'examen du schéma des circulations générales des courants d'air montre que la précision des mesures est acceptable. Par exemple, les débits dans les sections 1 et 2 devraient être identiques. La différence relative obtenue est de l'ordre de 5%. De même, le débit dans la section 3 devrait être la somme des débits dans la section 1 et 11 (1ère loi de Kirchhoff sur les réseaux maillés) ce qui est à peu près vérifié.

Cette erreur de l'ordre de 5% pourrait nous faire croire que la précision des mesures est aussi de 5%. Ce n'est pas le cas. Nous pouvons seulement penser que la reproductibilité est de cet ordre. La précision est inconnue. Mais c'est sans importance pour l'établissement de bilans du courant d'air qui est l'étude la plus instructive pour la compréhension d'un réseau.

La mesure de la section 6 est très intéressante. L'énorme débit de 3,18 m^3/s provient de deux termes principaux : le débit amené par les Saints de Glace et le débit amené par le Trou qui Souffle via la Conciergerie. On en déduit que le débit amené par le méandre François au niveau de la Conciergerie vaut 3,18 - 1,91 = 1,27 m^3/s. Il resterait à mesurer le débit de l'entrée historique du Trou qui Souffle pour confirmer ce rapport.

Le devenir de ce débit est une des clés des explorations futures du Trou qui Souffle. On voit que le toboggan des Naïades (depuis les élargissements nombreux dont il a bénéficié) récupère 25 % de ce débit. Le réseau Chiffré récupère 29 % , ce qui paraît bien peu ! Le Labyrinthe en récupère 4%. Ce qui est intéressant est qu'on perd le reste du courant d'air soit 1,32 m^3/s, soit 42 %. C'est énorme et mérite une vérification. Si cette perte se confirme, il sera nécessaire de passer au peigne fin les galeries pour déterminer l'origine de la fuite. Le plus probable est de penser que le passage du lac de la Boussole n'est pas le seul passage pour le courant d'air allant à Pâques Nord, mais qu'il doit exister un passage supérieur. Il suffirait pour le vérifier de faire des mesures de débits en bas du premier puits du réseau Chiffré.

f) Méthode par dilution

On a déjà parlé plus haut de la méthode par dilution. Elle consiste à produire une certain gaz de débit constant et régulier dans la galerie pour obtenir un régime permanent (par exemple CO_2 produit par la combustion d'un réchaud butane). Ce gaz se dilue dans le courant d'air. On se place assez loin pour que le mélange se soit fait correctement et on mesure la concentration du traceur. Le rapport des concentrations est égal au rapport des débits. Connaissant le débit du traceur, on en déduit le débit du courant d'air.

g) Mesure des débits avec un manomètre différentiel sensible

On a déjà vu cette méthode au § 3.1.3. Le gros avantage de cette méthode est la discrétion possible des appareils qui la rend unique pour des enregistrements sur de longues durées. Elle fournit aussi le sens du courant d'air.

3.2.3. Puissance advectée par un courant d'air, débit d'enthalpie

Montrons un exemple de détermination à la grotte de la Ture (Vercors).

a) Description de la grotte de la Ture

La grotte de la Ture s'ouvre par un entonnoir de 10 m de diamètre. Une pente assez raide permet de pénétrer dans un porche de 3 m de hauteur et 8 m de large. À la première salle, succède en contrebas la Grande Salle qui atteint 25 m de large, pour 60 m de longueur.

Aussi bien à l'ouest qu'à l'est, on peut descendre sur des blocs et rejoindre des sortes de galeries limitées d'un côté par des blocs et de l'autre côté par la roche en place. L'examen de cette salle fait penser qu'elle résulte de l'effondrement d'une galerie creusée dans les sables albiens. En amont sous l'entrée, des boyaux permettent de rejoindre ces sables.

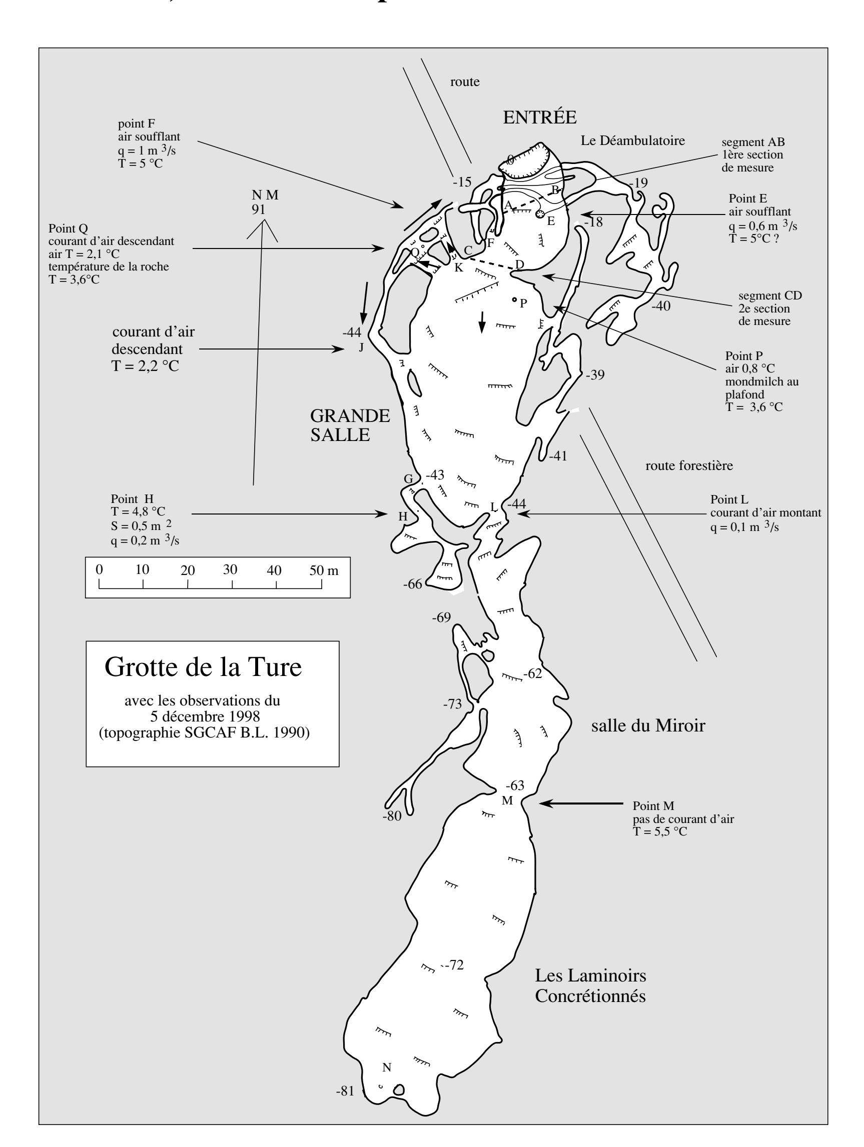


Fig. 3-16- Plan de la grotte de la Ture à Autrans

Map of Ture cave with measured values of velocities and temperatures (Vercors, France)

b) Le courant d’air

La grotte de la Ture est un magnifique piège à air froid. En hiver, l’air froid extérieur coule par le porche d’entrée sur le sol de la galerie et descend dans la Grande Salle. Là, il se ramifie en 3 branches principales. Deux qui empruntent les galeries latérales ébouleuses, et remontent vers l’entrée. Un puissant courant d’air chaud (1 m^3/s au moins) sort des blocs en contrebas de l’entrée et s’échappe vers l’entrée en léchant le plafond. Au fond de la Grande Salle, un faible courant d’air résiduel s’enfonce dans l’éboulis et ressort au-dessus de la salle du Miroir, au niveau d’un pilier stalagmitique. Le courant remonte en suivant le plafond de la Grande Salle.

C’est l’éboulis de la salle qui est responsable de ce courant d’air. Les blocs présentent une surface de contact énorme, ce qui leur permet de chauffer efficacement l’air qui y circule. En hiver, ils constituent la réserve de chaleur (la source chaude) alors que l’air extérieur constitue la source froide.

Au § 3.1.1.c, on a présenté la température en trois points durant 12 jours.

c) Visite du 5 décembre 1998 (cf. Lismonde, 1999)

Malgré la largeur de la galerie d’une dizaine de mètres, le courant d’air était net avec une vitesse de l’ordre de 1 m/s, descendant (aspirant) en bas de la galerie et soufflant vers l’extérieur au plafond. À certains moments, correspondant sans doute à de petites rafales du vent à l’extérieur, le courant d’air se modifiait sensiblement.

Les températures étaient très différentes entre le plancher et le plafond. Au plancher, les températures étaient de l’ordre de 0°C (concrétions de glace) alors qu’au plafond, elles atteignaient 3,5 °C. Le plafond présentait quelques mousses qui laissaient suinter l’eau. Un relevé détaillé des vitesses et des températures dans cette zone d’entrée a permis d’estimer les bilans de masse et d’enthalpie pour l’air parcourant la grotte.

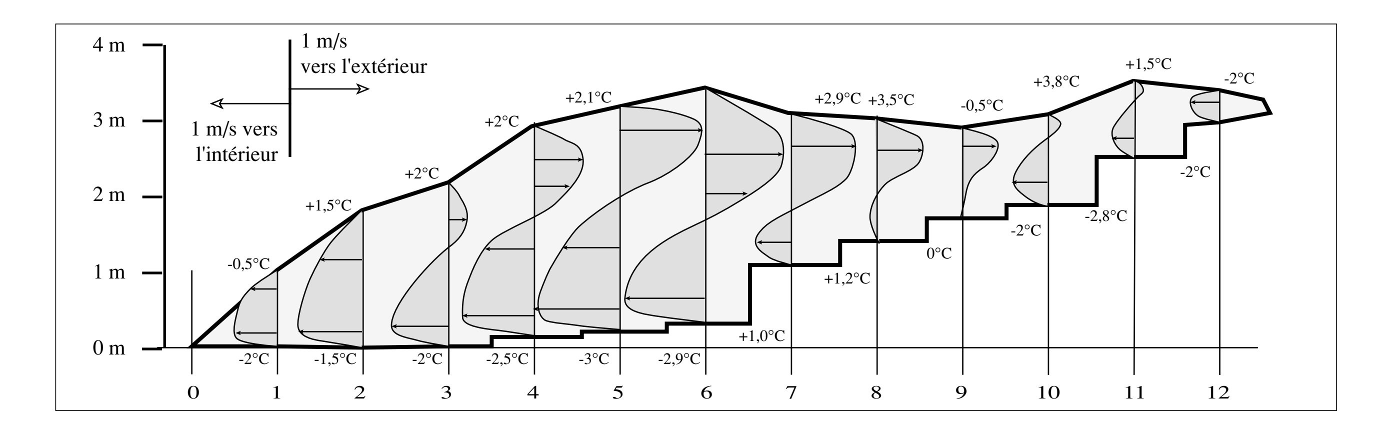


Fig. 3-17- Les profils de vitesse et la température dans la section de mesure
Les vitesses sont longitudinales. Elles ont été rabattues pour la lisibilité.

Velocity profiles and temperatures in the section drawing of La Ture gallery

Dans la Grande Salle, le courant d’air était plutôt descendant. Les laminoirs concrétionnés du bas n’étaient parcourus par aucun courant d’air.

d) Visite du 18 septembre 1999

En descendant dans la grotte, on sentait la fraîcheur venir rapidement. Au niveau du trou souffleur (correspondant à la section des premières mesures de décembre) la température était 8,9°C. On ne sentait aucun courant d’air. Un peu plus bas à l’entrée de la Grande Salle, la température était 5,6°C. À cet endroit non plus, aucun courant d’air n’était sensible. Au bas de la première grande salle, la température était 5,0°C. Dans le passage resserré entre les deux salles, pas de mouvement d’air. Au bas de la deuxième salle, juste avant la remontée vers les laminoirs, la température était 5,0°C alors que l’eau dans une petite bassine sous les concrétions était à 4,6°C. Au bas de la grotte, au terminus des laminoirs, l’air était à 4,9°C alors que l’eau un peu plus haut était à 4,7°C.

Le même jour, la température de l'eau à la résurgence de la Goule Noire était de 7,6°C. Elle est située 650 m plus bas que la grotte.

Cette visite a donc montré que la grotte pouvait être considérée comme un piège à air froid, parcourue par une circulation d'air uniquement en hiver.

e) Bilans de masse et d'énergie (sortie du 5 décembre 1998)

Les intégrales ont été calculées numériquement en discrétisant la surface en mailles égales. On a complété les mesures en traçant les profils de vitesse et on a effectué une discrétisation avec un pas vertical de 0,2 m et un pas horizontal de 1 m. Pour les températures, la précision n'est pas très grande car on manque de points de mesure. Cette discrétisation conduit à un tableau de valeurs que l'on a saisi sur un tableur et l'intégrale est calculée en multipliant dans une maille les valeurs par la surface de la maille et en faisant une sommation pour toutes les mailles. Cette méthode est identique à celle que l'on a détaillée au § 3.2.2.d. Pour le débit d'énergie, on a multiplié dans les cellules du tableur le débit masse élémentaire par l'enthalpie spécifique. L'expression de cette dernière est donnée, en fonction de la température et de l'humidité, dans le tome 2 § 1.1.5.f. Les résultats sont donnés dans le tome 2 au § 3.1.2.

3.3. Caractéristiques régionales

3.3.1. Mesure de la résistance aéraulique d'un tronçon de galerie

La relation entre la perte de charge et le débit masse s'écrit : $\Delta p = R\, q_m^2$. Cette relation définit la résistance aéraulique qu'on note R. L'estimation de R ne peut être qu'indirecte (somme de pertes de charge prises dans des publications ou estimées sur le terrain). La seule méthode sûre est la mesure directe. Il serait souhaitable de constituer un petit catalogue de valeurs de R pour des réseaux bien connus, auxquels on pourrait se rapporter en cas de besoin.

Cette mesure n'a un sens que si le débit de courant d'air se conserve tout le long de la galerie. S'il y a des diffluences, on doit tronçonner la galerie en longueurs plus petites. Mais la résistance aéraulique de la portion AB ci-dessous a un sens car le débit en A est égal au débit en B.

a) Principe de la mesure

On déroule un tuyau souple en plastique transparent tout le long d'une galerie et on mesure la différence de pression à une extrémité.

Sur le dessin, on voit le principe de la mesure. Le tuyau est fermé à une extrémité par un manomètre à eau. Comme il n'est pas parcouru par un écoulement d'air, sa perte de charge est nulle. La pression motrice sur la branche de droite est égale à celle en bas du réseau. Alors que la pression motrice sur la branche de gauche a subi un déficit dû aux pertes de charges. On mesure la différence de pression Δp grâce à un simple tube en U rempli d'eau et on déduit la résistance sur le tronçon AB par la relation :

$$R = \frac{\rho_{eau}\, g\, h}{q_m^2}$$

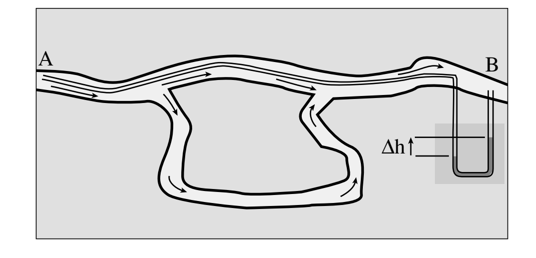


Fig. 3-18- Tronçon correct pour la détermination de la résistance aéraulique

Aeraulic resistance measured between A-B

Même si la température varie tout le long de la galerie, le tuyau qui n'est parcouru par aucun courant d'air se mettra automatiquement à la température de l'air ambiant. Il n'y a donc aucune correction de température à prévoir. On mesure le débit par intégration des vitesses dans une section. Matériel nécessaire : un anémomètre du genre de ceux utilisés pour les gaines de climatisation et un mètre à ruban pour la détermination de la section.

b) Installation des tuyaux

Des tuyaux souples transparents du genre de ceux utilisés pour l'aération des aquariums conviennent bien. On les trouve à 0,20 €/m à l'adresse suivante : Europrix, 58 boulevard Basly, BP 249, 62305 Lens Cedex.

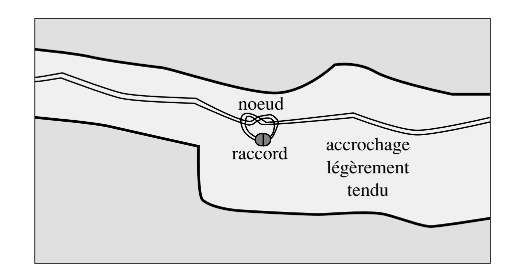


Fig. 3-19- Accrochage du tuyau et raccordement des tronçons

Duct hanging and connections

L'installation ne pose aucun problème. Ces tuyaux sont conditionnés en longueurs de 50 m qu'il faut raccorder. Le raccord est une pièce minuscule transparente. La tension sur le tuyau ne doit pas passer par le raccord. Il suffit de faire un nœud de raccordement sur le tuyau, ainsi la tension passe par le nœud. La température des cavités naturelles étant souvent basse, le tuyau peut devenir cassant. Il faut donc veiller à ce qu'il ne soit pas pincé et il faut limiter le rayon de courbure aux nœuds afin de ne pas compromettre le passage de l'air.

De même, il est préférable de mettre le manomètre à l'aval du courant d'air, afin que le tuyau soit en légère surpression.

c) Les dénivellations obtenues au manomètre à eau

Examinons le cas des Saints de Glace au Trou qui Souffle de Méaudre. Les vitesses dans la galerie de sortie des Saints de Glace est de 4 m/s par temps froid ou temps bien chaud. Cela représente une perte de charge singulière calculable par $0{,}5\ V^2 = 8$ Pa. On peut estimer le total des pertes de charges à une trentaine de Pascal. Ramené à une colonne d'eau cela représente 3 mm d'eau, ce qui est fort peu.

Il faut donc réaliser un manomètre sensible pour mesurer de faibles dénivellations. Un coup d'œil dans les catalogues d'instruments de laboratoires montre que les manomètres ordinaires du commerce ne sont pas assez sensibles. Par exemple, les manomètres pour mesurer les pertes de charge dans les installations de climatisation ne sont sensibles qu'à 10 Pa, ce qui est trop peu.

On a intérêt à remplacer la branche de gauche par un réservoir qui restera à niveau à peu près constant, le déplacement de l'interface de droite en est doublé. Une vanne trois voies permet de mettre la branche de droite du manomètre à la pression atmosphérique sans perte de charge. La lecture en est facilitée.

d) Le manomètre à eau à tube incliné

Il constitue une amélioration du manomètre précédent. C'est le manomètre que nous avons réalisé et utilisé en septembre 2000. Il est très simple, constitué par un tube en plastique transparent de diamètre intérieur 2 mm, disposé sur une règle inclinée d'un angle $\theta = 15°$ au-dessus de l'horizontale, ce qui fournit un gain de $1/\sin 15° = 3{,}8$ sur le déplacement de l'interface. Un niveau à bulle permet de contrôler l'horizontalité de l'ensemble. Ce manomètre est rempli d'un liquide rouge (eau + alcool) de masse volumique $\rho_{liq} = 980\ kg.m^{-3}$.

La mesure de la perte de charge se fait en deux temps. Le robinet 1 reste ouvert. On ne le ferme qu'au moment du transport. Le robinet 2 est alors ouvert et le robinet 3 est fermé. L'indication du ménisque est alors la pression atmosphérique. On ferme alors 2 et on ouvre 3, le ménisque descend sur la gauche et on relève la valeur l du déplacement. On en déduit la perte de charge par la relation $\Delta H = l \sin\theta$ (θ étant l'angle d'inclinaison de 15°). Cette perte de charge est exprimée en mCE (mètre de colonne d'eau). On passe à la perte de charge exprimée en Pascal par la relation $\Delta p = \Delta H\ \rho_{liq}\ g$. Un déplacement de 1 mm se voit parfaitement sur la règle graduée placée parallèlement au tube incliné. Ce déplacement correspond à une dénivellation équivalente de 1/3,8 = 0,263 mmCE soit encore 2,6 Pa ce qui est une bonne sensibilité. Cette précision suffira pour les forts courants d'air ou les tronçons assez longs.

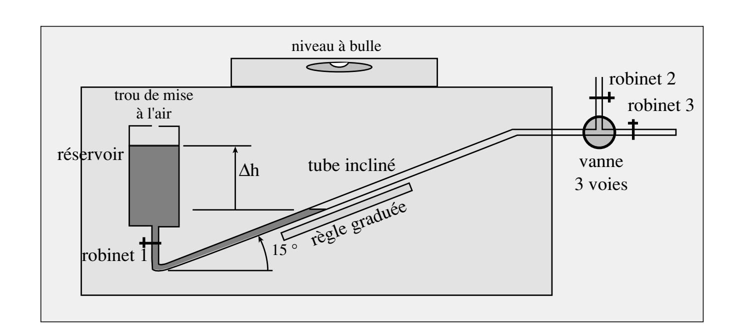


Fig. 3-20- Schéma du manomètre à eau à tube incliné

Inclined water manometer

e) Projet possible : un manomètre sensible, à deux fluides non miscibles

Pour des mesures de pertes de charge sur des tronçons courts ou avec des vitesses faibles, le manomètre incliné n'est pas assez sensible. Proposons un schéma, non encore réalisé mais classique, d'un manomètre bien plus sensible (mais sans doute plus difficile à mettre en œuvre sous terre).

Si on dispose de deux fluides non miscibles (eau - aniline par exemple), il est possible de construire un manomètre très sensible. On verse l'eau dans le flacon de droite, puis on verse lentement l'aniline, qu'on a colorée en rouge, dans le flacon de gauche, jusqu'à ce que l'interface se dispose au bas de la règle graduée. On tire le tuyau en amont de la singularité dont on cherche à mesurer la perte de charge. On relie ce tuyau à la branche de droite du manomètre (côté eau).

Le déplacement de l'interface eau-aniline quand la pression à droite augmente de Δp s'écrit :

$$h = \frac{\Delta p}{(\rho_a + \rho_e)\, g} \, \frac{S}{s}$$

On voit qu'on n'est pas limité pour l'amplification de ce manomètre. En prenant un diamètre de tuyau de 4 mm, et un diamètre de réservoir de 30 mm on obtient un facteur d'amplification de 56. On peut détecter un déplacement de l'index de 1 mm, soit une différence de pression de 0,36 Pa, soit une perte de charge singulière de coefficient K = 1 pour une vitesse aussi faible que 0,8 m/s. Si l'interface est nette, on peut imaginer d'apprécier quelques dixièmes de millimètres de déplacement d'où un gain supplémentaire de 5, soit une surpression de 0,07 Pa.

On rappelle que 1 mmCE ≈ 10 Pa = 0,1 mbar = 0,1 hPa.

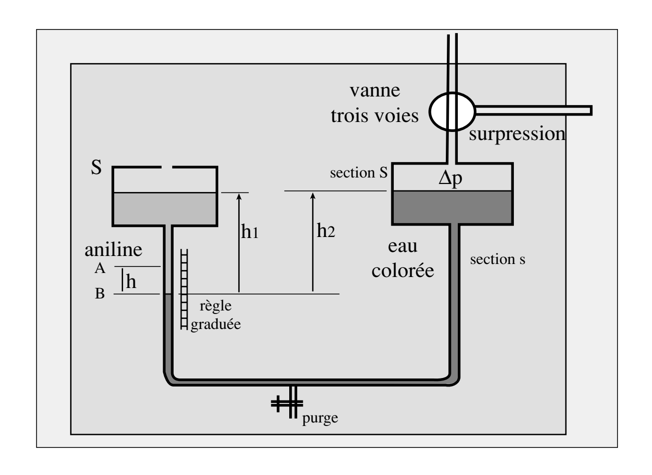


Fig. 3-21- Schéma d'un manomètre sensible à deux fluides non miscibles

Sensitive manometer with two unmiscible liquids

On peut caractériser la sensibilité des différentes sortes de manomètres à liquide en calculant la différence de pression (en Pa) correspondant à un déplacement de l'interface de 1 mm :

manomètre en tube en U	20,00 Pa
manomètre incliné avec réservoir	2,60 Pa
manomètre à deux liquides	0,36 Pa

Influence de la tension superficielle. Mais en réalité, on est limité par la force de traction exercée par l'interface eau-aniline. La présence d'impuretés dans le tuyau peut faire varier l'angle de raccordement entre la ligne diphasique et la paroi du tuyau de plastique. Il faudrait connaître la tension interfaciale entre ces deux fluides. Si on appelle σ cette tension, la force qui peut apparaître est au maximum de $\pi\, d\, \sigma$, ce qui correspond à une surpression $\Delta p = 4\, \sigma / d$. Pour $\sigma = 30.10^{-3}$ N/m, cela correspond à une différence de pression de 30 Pa. Il y a donc une sorte de rattrapage de jeu à faire en cours de manipulation si on ne veut pas avoir des problèmes de zéro. Pour cela il suffit d'aspirer côté mesure pour que l'index descende au-dessous de la valeur du zéro et vienne se mettre en position toujours dans le sens de la montée. On fait ensuite la mesure en tournant la vanne trois voies pour que l'index continue à monter et se stabilise à la bonne valeur.

Conclusion. Il est tout à fait possible de mesurer la perte de charge d'un écoulement d'air dans un conduit karstique. En 1947, Félix Trombe a déterminé la charge d'un écoulement par obstruction du conduit (Trombe 1947). Cette procédure est délicate à cause des fuites possibles. Celle qui consiste à dérouler un tuyau souple ne perturbe pas l'écoulement. Elle est donc plus sûre, mais elle est limitée à des tronçons pas trop longs. On s'est limité ici à l'utilisation d'un manomètre gratuit, mais on aurait pu utiliser un manomètre différentiel (cf. 3.1.3). On trouvera dans l'étude de la grotte de Mœstroff (Massen, 1997) d'autres renseignements sur les manomètres différentiels électroniques.

Exemple de détermination de la résistance aéraulique de l'entrée du Guiers Mort. Une mesure a été faite le 10 septembre 2000 en tirant un tuyau de 150 m de part et d'autre du réseau Sanguin. On a obtenu une résistance aéraulique de 27 $kg^{-1}.m^{-1}$. Cette résistance est importante et traduit l'existence d'étroitures (cf. Lismonde 2000b). Les conduits habituels ont généralement des résistances beaucoup plus petites.

3.3.2. Mise en charge aéraulique d'un réseau

Si on bouche une entrée de cavité à courant d'air, par exemple une entrée soufflante, on empêche le courant d'air de sortir. De ce fait, le courant d'air qui arrive en amont augmente le niveau de pression de l'air dans les galeries près de l'entrée bouchée et ce phénomène correspond à une sorte de mise en charge aéraulique d'un réseau.

Il n'est pas très commode de boucher l'entrée d'un réseau. On peut citer les expériences de Trombe en 1947 et de Lismonde en 1991.

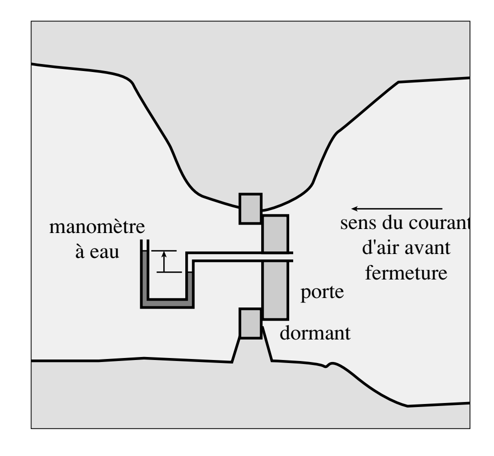


Fig. 3-22- Schéma montrant la fermeture possible d'une galerie au moyen d'une porte

Closing of a gallery with a gate

Cette expérience ne peut se faire que si la galerie d'entrée présente un rétrécissement sérieux pouvant être occlus. Le plus simple serait de constituer une porte avec un cadre (le dormant de la porte) cimenté à la paroi. La porte doit être solide et munie d'un joint d'étanchéité afin d'assurer l'étanchéité au courant d'air. Le sens d'ouverture de la porte doit être choisi pour que la pression de l'air assure elle-même l'étanchéité. On a intérêt à calculer à l'avance la surpression prévisible afin de calculer aussi la force pour ouvrir la porte.

Le déroulement de l'opération est le suivant : on ferme la porte rapidement et d'une manière étanche. On note la valeur de la pression mesurée au manomètre à eau au cours du temps. Cette pression augmente d'abord très vite, puis de plus en plus lentement jusqu'à atteindre une valeur limite qui ne varie plus. On note cette valeur. On recommence plusieurs fois cette opération afin d'améliorer la précision.

Cette mesure de la mise en charge aéraulique du réseau permet d'obtenir des indications sur les volumes concernés par ce phénomène.

Exemple de mesure : l'expérience de Trombe en 1947 (Trombe 1947)

L'entrée du puits du Mistral était parcourue par un débit masse d'air q_0 . Félix Trombe ferma l'entrée par une porte et mesura l'évolution de la pression au cours du temps. Il observa une variation de pression représentée sur la figure 3.24. La pression est exprimée en millimètres de colonne d'eau (1 mmCE = 9,81 Pa).

Il en fournit l'interprétation suivante : les pertes de charge sont supposées exister uniquement en A et B. La remontée de pression de 0 à 10,8 mm est instantanée. Ces 10,8 mm représentent donc la différence de pression entre la chambre et l'extérieur, c'est la perte de charge en A. Ensuite, la remontée est exponentielle, cela correspond au remplissage du volume V avec une loi de perte de charge linéaire (laminaire). La pression 12,3 mm correspond à la pression motrice du réseau.

On pose R la résistance aéraulique, rapport entre la différence de pression motrice et le débit masse. Comme Félix Trombe ne connaissait pas la valeur de la résistance qui s'oppose à l'entrée de l'air en B , mais q_0 le débit initial, il a mesuré la masse totale écoulée. Il en a déduit le volume de la cavité (calcul au tome 2, § 2.5.2) :

$$V = \left[\frac{q_0}{k\,\rho_0}\right]\frac{\rho_0}{\rho_a}\;\frac{p_a}{p_{ext} - p_0} \qquad \text{avec} \qquad k = \frac{p_a}{\rho_a\, V\, R}$$

Fig. 3-23- La cavité (Henne Morte) est schématisée par Trombe par un volume V séparé de l'extérieur par deux resserrements. Trombe a mesuré le débit en A (puits du Mistral), a bouché l'orifice A et a mesuré la remontée des pressions derrière la porte.

The Henne Morte system is sketched with a chamber and two narow galleries (A, B). Trombe has closed A entrance and has measured the pressure at gate A

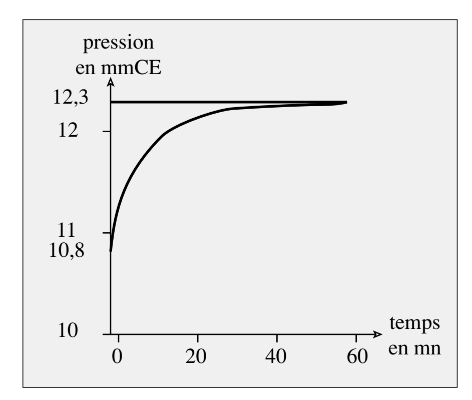
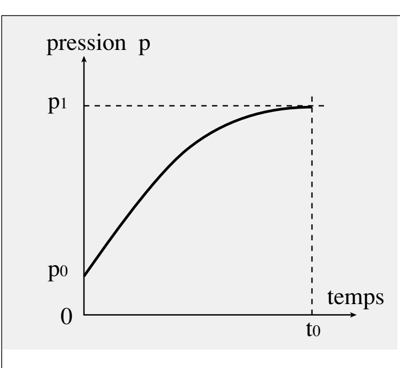


Fig. 3-24- La montée de la pression au cours du temps. Tout de suite, elle remonte à 10,8 mmCE, puis la montée est plus lente jusqu'à 12,3 mmCE.

Pressure versus time at the gate A of Henne Morte system



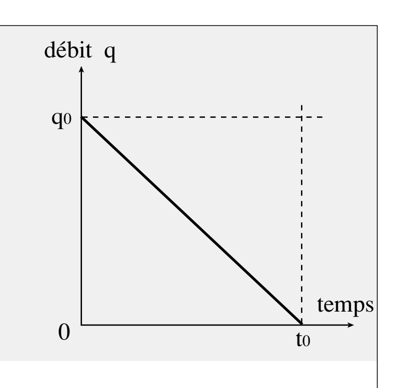


Fig. 3-25- Évolution de la pression et du débit avec prise en compte des non-linéarités. L'évolution de la pression en fonction du temps est parabolique, celle du débit est linéaire.

Pressure and flow versus time for a turbulent head-loss correlation

Félix Trombe, dans ses mesures, trouve $q_0 / (k\, \rho_0) = 400\ m^3$ avec $q_0 / \rho_0 = 0{,}785\ m^3\, s^{-1}$.
d'où la valeur de $k = 1/510\ s^{-1}$ et le volume de la cavité $V = 2{,}3.10^6\ m^3$.

Le calcul qu'a fait Trombe est tributaire de la validité des hypothèses. En premier lieu, et Trombe en était bien conscient, l'hypothèse d'une perte de charge laminaire est à revoir, car avec un débit de 700 l / s, il faudrait un diamètre énorme pour que l'écoulement soit laminaire.

On a proposé un nouveau calcul en prenant en compte une perte de charge variant comme le carré de la vitesse (Lismonde 1995) :

$$p = p_{ext} + (p_0 - p_{ext})\left(1 - \frac{t}{t_0}\right)^2 \qquad q = q_0\left(1 - \frac{t}{t_0}\right) \qquad \text{avec} \quad q_0 = \frac{\varepsilon}{R}\sqrt{p_0 - p_{ext}}$$

On constate en regardant les résultats sur la figure 3-25 que le débit varie linéairement alors que la pression varie d'une manière quadratique (comme une parabole).

On calcule le volume d'air entré dans la cavité $\Delta V = 0{,}5\ q_0\, t_0 / \rho_0$ soit $\Delta V = 583\ m^3$ au lieu de $400\ m^3$. On calcule aussi le volume de la cavité avec :

$$\Delta V = \frac{\rho_a V}{\rho_0\, p_a}\,(p_1 - p_0)$$

d'où $V = 3{,}3.10^6\ m^3$, valeur qui diffère sensiblement de celle obtenue avec l'hypothèse laminaire ($V = 2{,}3.10^6\ m^3$).

On peut calculer aussi la section équivalente du resserrement grâce à t_0. On trouve $s = 0{,}13\ m^2$ soit 0,4 m de diamètre équivalent pour l'étroiture au point B.

3.3.3. Respiration des cavernes. L'expérience de Conn (1966)

La mesure du courant d'air lors des fluctuations de la pression extérieure permet de remonter au volume de la cavité. Cette mesure concerne des cavités borgnes, habituellement sans courant d'air.

Malheureusement, il faut soit un grand volume pour avoir un courant d'air sensible, soit une grande variation de la pression atmosphérique. Pour être dans ce dernier cas, il faudrait profiter de l'approche d'un orage pour faire les mesures. Et, de fait, plusieurs spéléos ont constaté le phénomène de fort courant d'air soufflant à l'approche d'un orage.

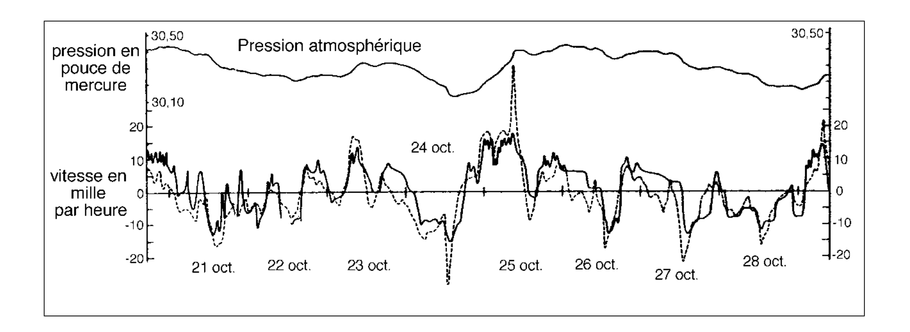


Fig. 3-26- Un exemple d'enregistrement de pression et de vitesse de l'air fait par Conn à l'entrée de Wind cave du 21 au 28 octobre 1965. En tireté, la vitesse calculée ; en trait plein, la vitesse mesurée

A record sample of wind and pressure curves, Wind cave entrance, (Conn, 1966)

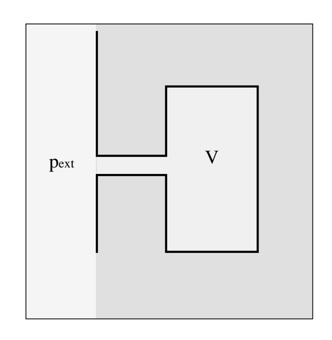


Fig. 3-27- Le modèle de cavité-ballon de Conn (Conn, 1966). Si la pression extérieure change, un débit apparaît dans la galerie de liaison

Cavity model of Conn for breathing. For a change of external pressure, it is a flow in gallery

Dans le tome 2 (§ 2.5.2.b), nous indiquerons les relations utilisables dans le modèle schématique de Conn et nous fournirons les éléments pour développer un modèle un peu amélioré.

3.3.4. Mesure de la propagation d'une perturbation de pression

Dans un volume restreint, les perturbations de pression se propagent à la vitesse du son si ces perturbations sont faibles, et plus vite que le son si ces perturbations sont très importantes (ondes de choc).

Si le volume est complexe comme celui d'une cavité naturelle, la vitesse de propagation est atténuée par des phénomènes de remplissage de salle qui ralentissent l'onde. D'une manière analogue, on sait que la vitesse du son dans un milieu diphasique, comme des bulles d'air dispersées dans l'eau, est nettement plus petite que la vitesse du son dans l'eau pure (1500 m/s) ou même que dans l'air (330 m/s).

On verra dans le tome 2 (§ 2.5.3) un modèle théorique pour la vitesse de propagation des perturbations de pression. Contentons-nous ici de la mesurer et pour cela prenons l'exemple du Trou qui Souffle de Méaudre.

Exemple du Trou qui Souffle (Méaudre)

Le Trou qui Souffle présente deux entrées à la même altitude et distantes de 2 km. L'entrée des Saints de Glace a été équipée d'une porte. En fermant rapidement cette porte, on a mesuré l'influence sur la vitesse de l'air à l'autre entrée. On trouve une vitesse de propagation de l'ordre de 100 m/s. Les détails de l'expérience ont été présentés dans la revue Karstologia à laquelle nous renvoyons (Lismonde, 1994). Nous nous contentons ici d'en rappeler les résultats principaux.

a) Description des réseaux et des courants d'air

Le Trou qui Souffle et les Saints de Glace. Le Trou qui Souffle est la plus importante cavité du Vercors. Fin 2001, elle développe 43 km de galeries pour une dénivellation totale de 670 m. Elle possède trois entrées connues. La première, le Trou qui Souffle proprement dit dont l'altitude de l'entrée est 1070 m. La deuxième entrée s'appelle les Saints de Glace, elle est aussi artificielle. Cette entrée est 5 m plus bas en altitude. La troisième entrée est le Toboggan des Naïades situé à 1395 m d'altitude et qui est relié au reste du réseau par des conduits très étroits occasionnant une grande perte de charge. D'autres entrées existent car le courant d'air de l'entrée supérieure n'équilibre pas les deux autres.

Il y a deux possibilités de jonctionner les deux entrées inférieures. Soit en restant dans les calcaires sénoniens par la galerie Polyphème (1,5 km), soit en empruntant l'Urgonien par la galerie François (2,5 km).

b) Le courant d'air du Trou qui Souffle

Le Trou qui Souffle fonctionne comme un tube à vent entre les entrées basses et l'entrée haute inconnue, mais ce tube à vent est très ramifié. On a montré sur la figure ci-contre les circulations principales. En été, le courant d'air sort par les Saints de Glace et par le réseau Bourgin. Une obstruction des Saints de Glace s'accompagne d'une augmentation du débit à l'entrée principale.

c) Description des expériences

La manipulation a consisté à tenir ouverte la porte pendant une minute, puis à la tenir fermée pendant le même temps. Vu la rapidité de transmission du signal, les mesures ont eu lieu toutes les 5 secondes pour les trente premières secondes et toutes les 15 secondes pour les trente dernières secondes de chaque minute.

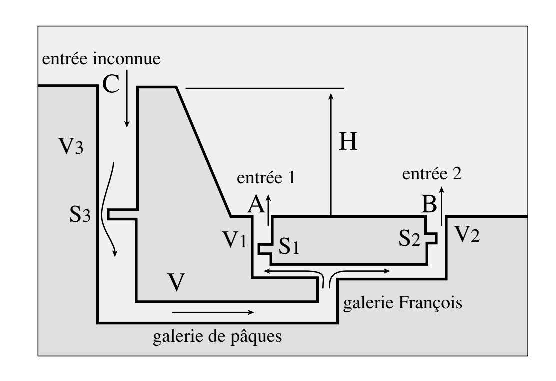


Fig. 3-28- Coupe partielle du Trou qui Souffle dans le plan méridien, montrant les trois entrées et la circulation du courant d'air en été. (le toboggan des Naïades n'est pas représenté) La source principale du courant d'air est la galerie de Pâques.

Sketch of summer air flows in trou Qui Souffle

L'expérience du 18 août 90. Ce jour-là, la température extérieure était 11,9 °C, la température du Trou qui Souffle 4,3 °C. Le temps était très beau, très calme, l'atmosphère parfaitement transparente, sans vent et la nuit était tombée. Ces conditions étaient très favorables, mais le régime thermique était évolutif (refroidissement extérieur). Le débit au Trou qui Souffle était voisin de 1,2 m^3/s pour une vitesse vers le centre de l'orifice de 2,4 m/s. Aux Saints de Glace, le débit était de l'ordre de 1 m^3/s pour une vitesse de 4 m/s. Les mesures ont duré 20 mn à partir de 21 h 40. Il y a eu 6 cycles d'ouverture et de fermeture.

Puisque le phénomène est quasi périodique, nous avons tracé la courbe des vitesses en fonction de la phase du cycle en superposant les 6 cycles. Cette opération augmente le signal, alors que le bruit (turbulence ou autre) n'est pas augmenté. Nous avons aussi corrigé les valeurs mesurées, de la lente dérive des vitesses qui vaut $-2{,}31.10^{-4}$ $m.s^{-2}$, en supposant que cette dérive était régulière.

Le faible nombre de cycles (6) n'a pas suffit pour obtenir une courbe lisse. Il reste aussi une dissymétrie entre la phase d'ouverture et celle de fermeture. L'ouverture (onde de détente) s'accompagne d'une diminution de vitesse qui s'annule juste au moment de la fermeture. La fermeture (onde de compression) fait apparaître un phénomène plus rapide, la vitesse rejoint son ancien niveau en 40 s. Cette dissymétrie n'est pas comprise, de même certaines fluctuations rapides (par exemple à 21 h 51) sont-elles dues à la turbulence ou à des phénomènes rapides, acoustiques par exemple ?

Pour déterminer le temps de propagation de la perturbation de pression, on a utilisé deux méthodes. La première est de calculer la moyenne du temps au bout duquel la vitesse a diminué ou augmenté de 0,1 m/s. On trouve 17,5 s pour l'ouverture et 18,3 s pour la fermeture. On peut prendre 18 s. On peut utiliser une autre méthode qui consiste à repérer les points d'inflexion (maximum des variations des vitesses), on trouve 15 s pour la fermeture et 20 s pour l'ouverture. Les deux méthodes fournissent des valeurs comparables. La distance parcourue étant de 1,5 km à 2,2 km suivant l'itinéraire, on voit que la vitesse de propagation est à peu près de 100 m/s.

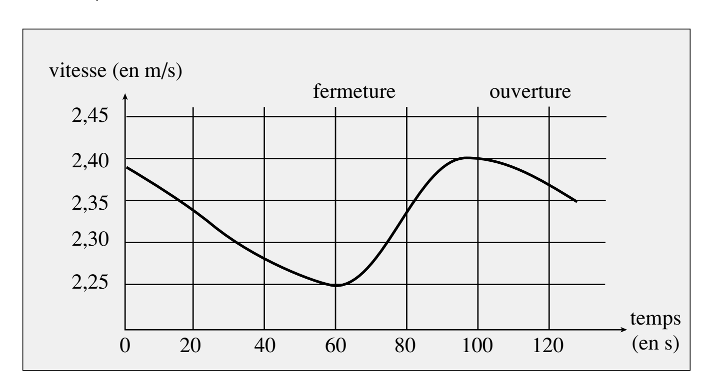


Fig. 3-29- Moyenne d'ensemble des 6 cycles. Un cycle dure 120 s. On remarque une dissymétrie entre l'ouverture et la fermeture.

Alternating of opening and closing the gate of trou Qui Souffle Ensemble mean of velocity versus time, on 6 periodes

d) Interprétation des résultats au Trou qui Souffle

Détermination théorique de la vitesse. La connaissance géométrique que nous avons de la cavité (Lismonde et al 1991), nous a permis de trouver la vitesse de la perturbation de la pression. Nous renvoyons le lecteur à la référence citée plus haut.

On peut représenter le fonctionnement du courant d'air du Trou qui Souffle à l'aide du schéma de la figure 3-28. L'orifice supérieur (inconnu) permet une entrée d'air importante en été. Ce débit se répartit entre les deux entrées inférieures (connues) A et B. La fermeture de l'entrée B entraîne une modification du débit à l'entrée A. Le terme moteur dans cet écoulement est la dénivellation entre l'entrée supérieure et les entrées inférieures (via la différence de température de l'air intérieur et extérieur, Trombe 1952).

Comme le réseau est maillé, on le décompose en trois tronçons AD, BD, CD caractérisés par n_1, n_2, n_3, L_1, L_2, L_3 et S_1, S_2, S_3 . Finalement le calcul du temps de propagation a fourni :

$$\Delta t = t_1 + t_2 = \frac{\rho_a}{\rho_0} \frac{1}{p_a} \frac{n_1}{S_1^2} q_1 \left(v_1 + v_2 \frac{q_1}{q_2} \right)$$

Pour le réseau du Trou qui Souffle, on peut admettre les valeurs suivantes : $v_1 = 5.10^5$ m^3 , $v_2 = 5.10^5$ m^3 , $n_1 = 6$, $S_1 = 2$ m^2, $\rho_a/(\rho_0\ p_a) = 10^{-5}$ Pa^{-1} et la mesure a donné $q_1 = 1{,}2$ m^3/s et $q_2 = 1{,}4$ m^3/s , ce qui fournit le temps $\Delta t = 16{,}7$ s, à comparer avec les 18 secondes mesurées pour le total.

Ce résultat assez bon ne doit pas cacher que ces estimations sont par définition assez grossières et qu'une erreur de 50 % peut survenir, suite à une mauvaise estimation des volumes par exemple. En réalité, cette mesure du temps de propagation d'une onde de pression peut fournir de meilleures valeurs pour les estimations du volume de grandes galeries, estimations facilement erronées si les dimensions sont importantes.

3.3.5. Traçage d'un courant d'air

a) Peut-on «tracer» le courant d'air d'un réseau souterrain comme on colore l'eau ?

Certains traçages ont eu lieu, par exemple, un lancer de pneu enflammé dans le scialet du Sanglier à Sornin pour repérer la jonction dans le Berger. Bien qu'une odeur ait été vaguement sentie, il n'y a pas eu de résultats probants. Un autre traçage a eu lieu entre deux réseaux du Mort Ru mais sans résultats clairs là non plus. La jonction entre le Berger höhle et le Cosa Nostra loch en Autriche a été faite à l'encens (mais la distance était très petite).

Tous ces procédés qui consistent à émettre de la fumée présentent l'inconvénient que la portée du traçage est très courte : quelques dizaines de mètres. En effet, les particules de fumées sont attirées par l'humidité des parois, et l'air se retrouve purifié très vite.

La seule méthode de traçage est d'utiliser un gaz et non une poussière. Au CEA de Grenoble, des essais ont lieu actuellement (1999) pour valider une méthode de traçage à l'aide d'injection dans l'air d'hexafluorure de soufre dont on peut détecter des traces. La méthode serait aussi sensible qu'une injection de fluorescéine dans l'eau. À suivre !

b) Le traçage d'un courant d'air

Comme pour un traçage dans l'eau. Il faut installer des préleveurs de gaz aux endroits supposés de sortie (il faut donc déjà les connaître). L'analyse des concentrations permettrait de trouver la courbe de restitution (distribution des temps de séjour). Contrairement aux traçages dans l'eau, on ne peut guère espérer trouver les sorties de courants d'air de cette manière. En revanche, la courbe de restitution permettrait d'accéder à des volumes, impossibles à estimer par un autre procédé. (cf. détermination des volumes). Cf. aussi § 2.2.D-2.

c) Les traceurs disponibles

Surtout pas des fumées, seulement des gaz non toxiques faciles à détecter en faible concentration comme l'hexafluorure de soufre vu plus haut.

Si on se contente d'une détection à l'odorat sans courbe de restitution, d'autres gaz font l'affaire. Citons à titre d'exemple, l'extraordinaire sensibilité de l'odorat pour certains gaz. Ainsi l'éthyl mercaptan (taper ce nom sur les moteurs de recherche internet pour obtenir les autres propriétés) est détectable à la concentration de $0,5.10^{-3}$ parties par million en volume. Le seuil de détection est défini par la condition que la moitié d'une population donnée arrive à le détecter. C'est ce gaz qui est introduit dans le gaz naturel inodore pour signaler les fuites éventuelles. L'odeur est désagréable et il faudrait, avant de l'utiliser, se renseigner sur les valeurs maximales admissibles pour éviter des accidents à l'injection.

Certains spéléos ont fait des essais avec des huiles essentielles utilisées comme adjuvants en alimentation ou cosmétique (renseignement Éric Sanson). Des expériences seraient à effectuer pour tester l'adsorption possible de certaines molécules par l'eau des parois et l'argile des remplissages.

d) Quantité de traceur à injecter

Comme pour le traçage à l'eau, la quantité à injecter devrait être à peu près proportionnelle au volume d'air qui sépare l'injection du point de détection.

Par exemple, pour une distance à parcourir de 2 km, une section moyenne des parties connues (en intégrant les salles) de 200 m^2, et un volume attendu de 400 000 m^3, pour une limite de dilution mesurable de 10^{-8}, un volume à l'injection de $100 \times 400\,000 \times 10^{-8} = 0,1$ m^3 de gaz devrait suffire pour obtenir un rapport signal sur bruit exploitable. Ce volume serait facilement obtenu au moyen d'une petite bouteille d'un litre de gaz comprimé à 100 bars.

3.3.6. Dispersivité des écoulements dans un réseau karstique

a) Phénomène de diffusion-dispersion

Supposons qu'on ait ajouté à l'air en mouvement un traceur dont on peut suivre l'évolution des concentrations le long de la galerie. Le traceur est d'abord transporté par l'air et sa vitesse devient rapidement celle de l'air, c'est le phénomène d'advection (appelé aussi convection). Ce traceur se mélange à l'air progressivement par le phénomène de diffusion turbulente. Les mécaniciens des fluides parlent de diffusivité turbulente alors que les spécialistes des phénomènes de transport parlent plutôt de dispersivité.

La vitesse d'advection d'un traceur passif (c'est-à-dire inerte aussi bien vis-à-vis des parois que du fluide lui-même) est la vitesse moyenne de l'air. Une vitesse de diffusion mesurée en regardant la vitesse de dilatation du nuage de contaminant n'est pas constante. La distance parcourue est proportionnelle à la racine carrée du temps, c'est-à-dire que la vitesse de diffusion est inversement proportionnelle à la racine carrée du temps. On en conclut que dans un phénomène de diffusion convection, pour les temps très courts, le phénomène de dispersion est le plus efficace, mais pour les temps plus longs, c'est le phénomène d'advection qui est prépondérant.

b) Comment une courbe de restitution de traçage de l'air peut-elle renseigner sur le réseau ?

C'est un des grands problèmes non résolus de l'hydrogéologie karstique. Au cours du traçage d'un cours d'eau souterrain, la courbe de restitution est soigneusement mesurée à l'aide de préleveurs automatiques fort coûteux, sous prétexte qu'on tirera beaucoup plus de renseignements de cette courbe que d'un simple charbon actif qui ne fournira qu'une réponse du genre tout ou rien. Mais l'exploitation qui est faite des courbes de restitution se limite actuellement à la simple mesure du temps de passage et du coefficient de restitution. Ce n'est que dans le cas de traçages dans des sables ou des alluvions (décrits convenablement par une loi de Darcy : proportionnalité entre la perte de charge et le débit) que les modèles mathématiques fournissent des renseignements détaillés sur la porosité et différentes caractéristiques de l'aquifère. En milieu karstique, les mathématiciens ont, jusqu'à présent, baissé les bras devant la complexité des phénomènes et les hydrogéologues se contentent de vagues indications qualitatives.

Cet état de fait n'est que provisoire. Le problème de faire dire à une courbe de restitution plus qu'une simple vitesse moyenne et un coefficient de restitution est très difficile car il s'agit d'un problème inverse. À partir des résultats, il s'agit de retrouver les propriétés à l'origine de ce résultat. Ce problème a une infinité de solution et, de ce fait, l'exploitation d'une courbe de traçage demande de nombreuses expériences préalables afin de restreindre justement le nombre de solutions. Des expériences sont en cours (Jeannin, 1996) mais le problème reste retors.

La facilité des mesures avec des traceurs aériens offre un joli champ d'expérimentation futur. Il est probable que ce sont des mesures de courants d'air qui permettront, dans l'avenir, de construire le cadre théorique pour exploiter les courbes de traçages dans les écoulements karstiques noyés.

c) Conduite d'une expérience de dispersion dans un réseau souterrain

Dans le principe, c'est assez simple. Il faut disposer d'un traceur et d'un appareil de mesure instantané de la concentration de ce traceur (cf. § 3.1.5.b).

On crée un apport instantané de ce traceur dans le courant d'air (c'est le Dirac cher aux analyseurs de signaux). Cet apport pourrait consister en la libération rapide du dioxyde de carbone contenu dans une petite bouteille d'air comprimé. On calculerait la quantité maximale et le temps de libération pour éviter de dépasser localement les 2 ou 3% de dioxyde de carbone. Un second opérateur placé à une certaine distance en aval et muni d'un détecteur de CO_2 à infrarouge notera les concentrations au cours du temps (à la main ou à l'aide d'un enregistreur). Cette expérience sera reprise un certain nombre de fois pour différentes distances au point d'injection. La confrontation des résultats avec la topographie de la galerie (élargissements, diffluences, sinuosités…) permettra, d'expérience en expérience, de proposer un modèle de dispersivité. Ce travail, qui n'a pas encore été entrepris à ma connaissance, correspond parfaitement au volume de travail d'une thèse universitaire.

3.4. Autres études possibles à partir de mesures sur l'air

Contentons-nous de donner une liste non exhaustive de recherches possibles.

3.4.1. Photographie infrarouge aérienne en hiver pour repérer les trous souffleurs chauds

Les spéléos du Var ont fait effectuer par hélicoptère des campagnes de survol du massif de Siou Blanc avec prise de vue en thermographie infrarouge. L'idée est que le courant d'air soufflant d'une cavité perturbe thermiquement le voisinage et cet effet doit être décelable.

En réfléchissant sur cette méthode, on voit qu'il vaut mieux un courant d'air plus froid que l'air ambiant pour que cet air froid stagne près du sol. Un courant d'air chaud aura tendance à monter droit dans le ciel sans perturber thermiquement le voisinage. Cette méthode conviendra donc surtout pour la détection d'entrée basse en été. Mais peut-être que la thermographie infrarouge renseigne aussi sur l'existence de zones broyées riches en humidité, et de propriétés thermiques différentes du voisinage. Dans ce cas, le courant d'air n'est pas nécessaire à la détection.

3.4.2. Mesure des anomalies thermiques aux entrées hautes et basses

Il serait intéressant de déterminer expérimentalement l'amplitude de l'anomalie thermique aux entrées basses et hautes de cavité. Il suffirait de disposer trois thermomètres enregistreurs. L'un à l'extérieur, le deuxième dans la cavité près de l'entrée et le troisième dans le réseau profond. Une confrontation avec un modèle théorique (cf. tome 2 § 3.3.5.h) sera très instructive.

3.4.3. Efficacité d'un piège à air froid et d'un piège à air chaud

Les pièges à air chaud ou à air froid offrent un champ d'investigation assez facile et presque amusant. La détermination de la température moyenne à l'aide d'un thermomètre enregistreur comparé à celle de l'air extérieur permettra de trouver l'écart entre les températures moyennes et donc d'apprécier l'efficacité du piège. Nous reprendrons dans le tome 2 l'étude de la grotte de la Ture en Vercors (tome 2 § 3.1) et nous verrons que le rôle de l'eau est tout à fait essentiel.

3.4.4. Fonctionnement d'une glacière

Le changement d'état d'eau en glace s'accompagne d'une libération importante de chaleur. Les glacières ne sont donc pas des pièges à air froid ordinaires. La grande inertie thermique de la glace offre aussi l'intérêt d'un lissage temporel des conditions extérieures souvent très fluctuantes. Les glacières sont donc des enregistreurs de variations séculaires d'un ensemble de paramètres de l'atmosphère : température, style de variation de la température, précipitation… Dans le tome 2 (§ 3.1.a) nous présenterons l'étude succincte de la glacière de Corrençon en Vercors.

3.4.5. Réponse thermique et aéraulique d'un réseau à une fluctuation de température

Si une forte variation de la température de l'air extérieur survient après une période de température relativement uniforme, les conditions sont bien remplies pour étudier la réponse de la galerie d'entrée aspirante d'un réseau à une impulsion thermique. La détermination des températures tout au long de la galerie permettra de fournir une valeur expérimentale du coefficient d'échange thermique. Cela n'a jamais été fait et l'enjeu est important pour la modélisation thermique du karst (cf. tome 2, § 1.4.3.e).

3.4.6. Suivi thermique annuel d'un tronçon de galerie. Coefficient d'échange enthalpique expérimental

De même, le suivi annuel des températures en deux ou trois points de la galerie permettra de fournir un coefficient d'échange (nombre de Nusselt) moyen adapté à la cavité. La complication des écoulements d'eau rendra délicate l'interprétation des mesures. Il serait intéressant de tester expérimentalement l'analogie de Lewis (cf. tome 2, § 1.5.3.b).

3.4.7. Circulation de l'air dans un réseau en U à deux entrées de mêmes altitudes

L'instabilité, du style piège à air froid, d'un réseau à deux entrées de même altitude offrira des mesures analogues à celles qu'on peut faire sur les pièges à air froid. La possibilité théorique (mais peu probable) d'inversion du sens du courant d'air hivernal d'une année sur l'autre sera excitante pour l'expérimentateur (cf. tome 2, § 3.6.6.b.2).

3.4.8. Construction d'un modèle aérologique en terme de résistances aérauliques

Pour un réseau assez bien connu sur le plan spéléologique, il est possible à l'aide de quelques mesures de températures et de quelques débits, bien réparties au cours de l'année, de proposer un modèle aérologique de la cavité. Les effets de mémoires (hystérésis) pourront être négligés dans un premier temps. Si le modèle marche bien, les plus courageux porront ensuite essayer de développer un modèle tenant compte de la mémoire thermique de la cavité et du rôle de l'eau. Bien entendu, il ne faudra pas vouloir obtenir un modèle prévisionnel très précis sous peine de déception !

3.4.9. Réponse d'un réseau à une perturbation de pression (orage). Estimation d'un volume souterrain

La fréquentation assidue de certains réseaux par les spéléos d'un club permet d'envisager le cas d'arrivée d'un violent orage. Un simple altimètre permettra de relever à la surface l'évolution de la pression au cours du temps. Une mesure même sans instrument du débit de l'air conduira à la détermination du volume de la cavité.

3.4.10. Fonctionnement d'un réseau en résonateur de Helmholtz

Il serait très intéressant de repérer des réseaux susceptibles de fonctionner en résonateur de Helmholtz. Pour cela, il faut qu'ils soient constitués d'une galerie assez régulière suivie par une salle de volume suffisant et fermée. Une recherche à partir d'un inventaire spéléo peut déjà permettre de sélectionner la cavité prometteuse. Ensuite, il faut aller mesurer les courants d'air un jour de vent. Les rafales seront notées par un observateur extérieur, alors que le courant d'air sera noté par un observateur dans le conduit d'accès à la salle. Les deux signaux présenteront de fortes analogies. Le fonctionnement en oscillateur se verra à l'apparition d'une fréquence propre supplémentaire dans le signal du courant d'air, cette fréquence étant indépendante de celle des rafales du vent extérieur et étant calculable à partir des caractéristiques géométriques de la cavité (cf. tome 2, § 2.5.6).

On pourrait utiliser aussi un manomètre différentiel très sensible (0,01 Pa) dont une des branches serait reliée à une boîte indéformable et l'autre à l'atmosphère. La boîte serait percée d'un trou minuscule (évent) qui permettrait de maintenir la pression dans la boîte à la pression atmosphérique tout en filtrant les variations infrasonores de pression.

3.4.11. Mesure du bruit d'un courant d'air

Les sonomètres sont des instruments qui se répandent dans les entreprises et les organismes de contrôle. Il est donc possible d'en emprunter un assez facilement. Il faut bien entendu connaître un courant d'air violent susceptible de bruire. Des mesures simultanées de l'intensité acoustique et de la vitesse permettrait de dresser des cartes du bruit au voisinage d'une étroiture. D'autres études acoustiques très prometteuses pourraient être entreprises à l'aide de cet appareil. Par exemple, pourquoi la présence de siphon fournit-elle de si beaux échos ? Quelle est la modification spectrale du bruit des cascades en fonction de la distance à la source. On se rend compte, en effet, que le bruit change et devient plus grave à distance.

3.4.12. Caractérisation annuelle des flux (masse, CO_2, enthalpie…) à une entrée de réseau

Le modèle aéraulique d'une cavité ayant été fait, on peut pour des conditions extérieures données calculer les flux annuels advectés par le courant d'air. Ces flux peuvent concerner l'énergie thermique, les masses de vapeur, le dioxyde de carbone ou toute grandeur transportée par le courant d'air. C'est l'établissement de tels bilans qui permettraient de proposer des modèles d'évolution d'une cavité et donc de faire de la spéléogenèse expérimentale (cf. tome 2, partie 4).

3.4.13. Paléo températures par mesure de la proportion O_{18}/O_{16} dans les concrétions

Ces mesures de composition isotopique sont très spécialisées et ne peuvent guère être conduites qu'en relation avec un laboratoire universitaire. On trouvera une bonne analyse dans FORD et WILLIAMS (1989 p. 369).

Conclusion

Cette liste des recherches possibles dans les réseaux karstiques est non limitative. La recherche est en réalité commandée par les questions que l'on se pose. Et l'éventail des questions ne peut être limité !

Ne jamais oublier, quand on entreprend une étude, que son intérêt scientifique est lié à l'extension possible des résultats à d'autres cavités.

Conclusion de la troisième partie

Cette partie s'est adressée aux spéléos désireux d'apporter leur contribution à l'étude du monde souterrain.

Le premier chapitre a consisté à présenter quelques instruments pour mesurer les caractéristiques de l'air à un endroit donné : la température, la pression, l'humidité, la composition, la vitesse. Le choix de l'instrumentation a été basé sur le prix et la facilité d'emploi. Quelques adresses internet permettent d'actualiser les renseignements en renvoyant aux sites des constructeurs.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes passés aux grandeurs qui nécessitent un calcul. Ce sont des grandeurs plus globales associées au courant d'air : débit masse, débit d'énergie ou d'enthalpie. Nous proposons une méthode simple de détermination du débit à l'aide d'une seule mesure de la vitesse et de la section mais au prix d'un choix attentif du site de mesure.

Le troisième chapitre s'applique à caractériser un tronçon ou la totalité d'une cavité au moyen d'un paramètre global. Nous détaillons la mesure de la résistance aéraulique qui est une caractéristique globale d'une galerie quant aux pertes de charge. Nous décrivons la mise en pression d'une cavité par obstruction d'une entrée et indiquons comment parvenir à une estimation du volume total. De même, la vitesse de propagation d'une perturbation de pression permet de tester sa propre connaissance du réseau. Le traçage de courants d'air par la mise en œuvre de l'hexafluorure de soufre est un intéressant projet qui attend son premier expérimentateur ! Des études sur l'évolution temporelle des teneurs en CO_2 d'un système tout entier, constituent aussi de beaux objectifs pour l'avenir. Une liste complémentaire est donnée à la fin.

Index alphabétique des cavités citées dans le tome 1 - Vent des Ténèbres

Index alphabétique des noms cités

Ne sont citées que les personnes non mentionnées dans les remerciements ou la bibliographie (tome 2).

Index alphabétique par mots

On trouvera la pagination des paragraphes à la table des matières page 8.

Imprimé le 20-02-2002
par Coquand imprimeur
26, rue de Comboire - 38130 Echirolles